



**Valdemar Celestino
Monteiro**

**Algoritmos de alocação dinâmica de recursos rádio
para sistemas 4G baseados em MC-CDMA**



**Valdemar Celestino
Monteiro**

**Algoritmos de alocação dinâmica de recursos rádio
para sistemas 4G baseados em MC-CDMA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Atílio Gameiro, Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Rui L. Aguiar Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro do Projecto MATRICE,
IST-2001-32620.

o júri

presidente

Doutor João Nuno Pimentel da Silva Matos
professor associado da Universidade de Aveiro

vogais

Doutor Atílio Manuel da Silva Gameiro
professor associado da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutor Rui Luís Andrade Aguiar
professor auxiliar Universidade de Aveiro (Co-Orientador)

Doutor Fernando José da Silva Velez
professor auxiliar Universidade da Beira Interior

agradecimentos

Ao Prof. Dr. Atílio Gameiro, meu orientador e ao Prof. Dr. Rui L. Aguiar, co-orientador, pelo apoio, disponibilidade e possibilidade de adquirir conhecimento, experiência com rigor junto deles.

Ao projecto MATRICE, IST-2001-32620, pelo apoio financeiro e possibilidade de partilhar conhecimentos numa equipa multidisciplinar.

À Universidade de Surrey e à France Telecom R&D, ambos parceiros do projecto MATRICE, pela possibilidade de partilhar o simulador de sistema utilizado neste trabalho.

Ao Instituto de Telecomunicações – pólo de Aveiro pelas excelentes condições de trabalho que me proporcionou e aos colegas do grupo interno MOTION, pelo acompanhamento e o frequente contributo neste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Nuno Matos com quem iniciei a carreira de investigação, ainda na fase final de licenciatura e que vem desde então a acompanhar meu percurso.

palavras-chave

Scheduling de pacotes, alocação dinâmica de canais, gestão de recursos rádio, QoS, MC-CDMA, simulação de sistema.

resumo

Este trabalho considera o processo de *scheduling* de pacotes para sistemas rádio móvel da 4ª geração baseados em MC-CDMA. É proposto um algoritmo que se baseia na priorização de pacotes usando uma métrica que combina requisitos de serviço com a qualidade da ligação, i.e., usa informação proveniente da camada física e camadas superiores para decidir quais os pacotes que devem ser transmitidos. O algoritmo proposto é comparado em termos de desempenho com o algoritmo que maximiza o *throughput* da célula, e que se baseia exclusivamente na qualidade da ligação física.

Para permitir um enquadramento adequado do contexto onde se insere o problema tratado, inclui-se neste trabalho uma análise da evolução das comunicações móveis e dos requisitos e expectativas previsíveis para a componente de banda larga de 4ª geração, bem como uma descrição dos principais estudos e parâmetros definidos pelo projecto europeu MATRICE, onde este trabalho se insere.

Tendo em conta que a análise de esquemas de alocação dinâmica de recursos rádio é feita normalmente com recurso a simulações, apresenta-se igualmente o modelo de simulação utilizado neste trabalho. O modelo de simulação a nível de sistema inclui interfaces simplificadas à camada física e rede IP, com o objectivo de não sobrecarregar as simulações, tratando-se os cálculos ao essencial das da parte de sistema. Relativamente às interfaces com a camada física, duas interfaces foram implementadas, interface de valor médio para simulação de aplicações tempo-real em que tempo de sessão é normalmente superior ao tempo de coerência do canal e interface de valor actual para aplicações do tipo comutação de pacotes em que o tempo de sessão é pequeno comparado com tempo de coerência do canal.

A avaliação do desempenho dos algoritmos de *scheduling* propostos é feita utilizando um sistema gestão de recursos semelhante ao proposto pela 3GPP para o HSDPA que inclui modulação e codificação adaptativa, ARQ Híbrido com o *Chase combining*.

Os resultados obtidos mostram que o algoritmo proposto em comparação com o que maximiza o *throughput* revela-se num mecanismo mais adequado para *scheduling* de pacotes quando os requisitos de serviços devem ser levados em conta e que o aumento da satisfação de utilizadores, medido pelo número de utilizadores satisfeitos, é feito com base na diminuição do *throughput* da célula. Os resultados mostram ainda que a escolha de diferentes parâmetros permitem a afinação do algoritmo a diferentes comportamentos, optimizando o desempenho dependente do tipo de serviço e quantidade tráfego esperados no sistema.

keywords

Packet scheduling, dynamic resource allocation, radio resource management, QoS, MC-CDMA, system level simulation.

abstract

This work deals with packet scheduling algorithms for the broadband component of 4G systems. A scheduling algorithm that combines QoS requirements with information from the physical layer is proposed and its performance assessed against the scheduling algorithm used in HSDPA that aims to maximize the throughput.

To provide the appropriate framework for the issues tackled in this dissertation, a description of the evolution of mobile communications along with the main requirements and alternatives envisioned for 4G systems is provided, where the main technological are taken from the European IST project MATRICE where the current work fits.

Since system level studies are performed resorting to simulations, a thorough description of the requirements and options used in the system level modelling is provided. The system level simulation model includes simplified interfaces models to the physical layer and to the IP layer, to avoid complex and heavy simulations. Physical layer interface included average value interface to be used in simulations of real-time applications, where session duration is longer than coherence time of the fading radio channel. Actual value interface is used for packet based applications where the session duration is short when compared to the coherence time of the fading radio channel.

The evaluation of the proposed scheduling algorithm is performed using a resource management system based on the 3GPP HSDPA which includes adaptive modulation and coding, Hybrid ARQ with Chase combining.

The results shown that when compared against the *maximum throughput* algorithm, the proposed algorithm is the most suitable for packet scheduling when both quality of service requirements and user satisfaction must be considered. Furthermore since the performance results represent a trade-off between the number of satisfied user and the cell throughput, it is possible through the appropriate parameterization to adjust the proposed algorithm to different behaviours according to the type and load of the traffic in the system.

*Em memória do meu irmão
Noel Celestino Monteiro (Nuia)*

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Organização da dissertação.....	3
1.3. Contribuições	4
2. Definição do cenário para os sistemas da 4ª geração.....	5
2.1. Enquadramento.....	5
2.2. O cenário de múltiplos sistemas rádio.....	6
2.3. Características dos sistemas da 4ª geração	9
2.3.1 Serviços e aplicações	9
2.3.2 Portadores rádio de serviços	13
2.3.3 Terminais.....	15
2.3.4 Componente de banda larga das redes da 4ª geração.....	16
2.4. Projecto MATRICE	22
2.4.1 Interface ar.....	22
2.4.2 Técnicas associadas	23
2.4.3 Cenários alvo	24
2.5. Resumo	24
3. Simulação a nível de sistema	25
3.1. Arquitectura de simulador de sistema	25
3.2. Camada física do sistema do MATRICE	28
3.3. Interface do simulador de sistema com a camada física	31
3.3.1 Interface de valor médio	32
3.3.2 Interface de valor actual	36
3.3.3 Conversão BLER vs. E_b/N_0 para BLER vs. P_u/I_o	39
3.4. Interface IP	40
3.4.1 Introdução.....	40
3.4.2 Descrição do módulo	40
3.4.3 Ficheiros de saída	44
3.5. Resumo	44
4. Algoritmos de scheduling.....	45
4.1. Introdução	45
4.2. Algoritmo de referência	47
4.2.1 Paradigma rede cablada e rede sem fio	47
4.2.2 Scheduling de referência – Maximização do <i>throughput</i> da célula	48

4.3.	Algoritmo de projecto.....	50
4.3.1	Função de prioridade do <i>scheduling</i>	51
4.4.	Estrutura do DRA e Cenário de simulação	54
4.4.1	Características do sistema	56
4.4.2	Métricas de desempenho.....	65
4.5.	Resultados.....	68
4.5.1	<i>Scheduling</i> de prioridade com os parâmetros de referência	70
4.5.2	<i>Scheduling</i> pelo SIR máximo	73
4.5.3	<i>Scheduling</i> de prioridade – Outras parametrizações	75
4.5.4	<i>Throughput</i> do sistema	79
4.6.	Discussão de resultados.....	81
5.	Conclusão.....	83
	Tópicos de trabalho futuro	84
	Anexo I – Descrição do simulador	89
	Modelos e módulos.....	89
	Arquitectura.....	94
	Capacidades inerentes	94
	Saídas.....	94
	Anexo II – Modelos de tráfego.....	95
	Modelo de Tráfego de Voz.....	95
	Modelo de tráfego de Web.....	95
	Anexo III – Interface IP: Ilustração de Captura e ficheiros de saída	
	97
	Referências.....	101

Índice de figuras

Figura 2-1: Cenário de complementaridade associado aos sistemas de comunicação móveis IMT-2000 (3G).....	7
Figura 2-2: Futuras redes dos sistemas Pós-3G incluindo interoperabilidade com uma variedade de potenciais sistemas de acesso.	8
Figura 2-3: Princípio da modulação OFDM.	18
Figura 2-4: Modulador / Desmodulador OFDM.....	19
Figura 2-5: Emissor / receptor MC-CDMA.	20
Figura 2-6: Diagrama de blocos de um sistema MIMO.....	21
Figura 2-7: Trama MC-CDMA proposto para o projecto MATRICE no espaço Código-Tempo-Frequência.....	23
Figura 3-1: Interface rádio estruturada em camadas.	26
Figura 3-2: Modelo de simulador de sistema com as interfaces com as camadas IP e física.....	27
Figura 3-3: Cadeia de simulação de referência a nível físico.	28
Figura 3-4: Estrutura de trama de 15 slots.	30
Figura 3-5: Atribuição código único e slot único.	34
Figura 3-6: Curvas de BLER vs. SIR do sistema do MATRICE para a interface por valor médio.	35
Figura 3-7: Curvas de BLER vs. SIR do sistema do MATRICE para a interface por valor actual.	39
Figura 3-8: Diagrama de blocos conceptual do módulo da interface IP e de suas interfaces.	41
Figura 3-9: Composição interna do módulo da Interface IP.....	42
Figura 3-10: Ilustração do conceito do ficheiro de saída.	43
Figura 4-1: Ligação entre dois nós em redes cabladas. <i>Scheduling</i> com base em informações de camadas superiores.....	48
Figura 4-2: Topologia das redes celulares.....	49
Figura 4-3: <i>Scheduling</i> para optimização da largura de banda nas redes sem fio.	49

Figura 4-4: Prioritização de tráfego com base em informação de camadas superiores e camada física.	50
Figura 4-5: Função da robustez na transmissão.....	52
Figura 4-6: Função de atraso.....	53
Figura 4-7: Função de tentativas de transmissão.	54
Figura 4-8: Estrutura e funcionalidades do DRA.....	55
Figura 4-9: Transmissão contínua com 4 canais H-ARQ paralelos.	60
Figura 4-10: Exemplo de transmissão do canal 3 do processo H-ARQ.	61
Figura 4-11. Serviço de voz: Função distribuição do BLER e atraso de transferência.	71
Figura 4-12. Serviço de voz: Função distribuição – Taxa de pacotes descartados.	71
Figura 4-13. Serviço de Web: Função distribuição do BLER e atraso de transferência.	72
Figura 4-14. Serviço de voz: BLER e atraso de transferência.	73
Figura 4-15. Serviço de Web. BLER e atraso de transferência.	74
Figura 4-16. Serviço de voz: BLER e atraso de transferência.	75
Figura 4-17. Serviço de Web: BLER e atraso de transferência.	76
Figura 4-18. Factor de atraso 0.3 versus 0.75 – Serviço de voz.....	77
Figura 4-19. Factor de atraso 0.3 versus 0.75 – Serviço de Web.....	78
Figura 4-20. 3 Tx vs. 6 Tx. BLER e atraso de transferência.	79
Figura A1-1. Diagrama de blocos do simulador.....	90
Figura A1-2. Fluxograma da simulação.	93
Figura A2-1. Característica típica de uma sessão de serviço de pacote.	95

Índice de tabelas

Tabela 3-1. Parâmetros do sistema de referência do projecto MATRICE.	29
Tabela 3-2. Mapeamento do MCS e ritmo de codificação no cenário de referência.	31
Tabela 3-3: Ficheiro de texto de um parâmetro genérico.	44
Tabela 4-1: Parâmetros de simulação.	64
Tabela 4-2. <i>Scheduling</i> de prioridade – Parametrização de referência.	69
Tabela 4-3. Simulações com valores dos parâmetros de prioridade para comparação.	70
Tabela 4-4: Comparação dos resultados de <i>Throughput</i> médio da célula.	80

Lista de acrónimos

3GPP	3rd generation partnership project
ACK	acknowledged
AMC	adaptive modulation and coding
ARQ	automatic request
BER	bit error rate
BLER	block error rate
BS	base station
CAC	call admission control
CBR	constant bit rate
CDF	cumulative distribution function
CDMA	code division multiple access
CPICH	common pilot channel
CQI	channel quality indication
CRC	cyclic redundancy check
DAB	digital audio broadcast
DiffServ	differentiated service
DL	downlink
DRA	dynamic resource allocation
DS-CDMA	direct sequence code division multiple access

DSCP	differentiated service control point
DVB	digital video broadcast
DVB-T	digital video broadcast – terrestrial
EDGE	enhanced data rates for GSM evolution
EGC	equal gain combination
FFT	fast Fourier transform
FTP	file transfer protocol
GPRS	general packet radio service
GSM	global system for mobile communications
HARQ	hybrid automatic request
HSDPA	high speed downlink packet access
IETF	Internet engineering task force
IFFT	inverse fast Fourier transform
IMT2000	international mobile telecommunications-2000
IP	Internet protocol
IPv6	Internet protocol version 6
IST	information society technologies
ITU	international telecommunication union
ITU-R	ITU radiocommunication sector
LAN	local area network
MAC	medium access control
MATRICE	multicarrier CDMA transmission techniques for integrated broadband cellular systems
MC-CDMA	multi carrier code division multiple access
M-Commerce	mobile commerce
MCS	modulation and coding scheme
MIMO	multiple input multiple output

MISO	multiple input single output
MS	mobile station
NACK	not acknowledged
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing
PDA	personal data assistant
PER	packet error rate
QoS	quality of service
RRM	radio resource management
RSR	relação sinal ruído
RU	resource unit
SF	spreading factor
SIMO	single input multiple output
SINR	signal to interference plus noise ratio
SIR	signal to interference ratio
SISO	single input single output
SMS	short message service
TCP	transport control protocol
TDD	time division duplex
TDMA	time division Multiple Access
TTI	transmission time interval
UL	uplink
UMTS	universal mobile telecommunications system
WLAN	wireless LAN
xDSL	x (a, s, h, v) digital subscriber lines

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

Nos anos recentes testemunhamos uma revolução das comunicações sem fio e móveis celulares. Esta revolução culminou com o aparecimento de um número inimaginável de terminais móveis a baixo custo, que em muitos países em poucos anos o número de assinantes de telefones móveis ultrapassava o número de telefones fixos. Na Europa, a primeira geração, analógica e com os terminais essencialmente instalados nos veículos, deu rapidamente lugar ao GSM (*Global System for Mobile Communications*) [1]. O GSM foi em parte o sistema responsável pela explosão no acesso ao sistema rádio móvel.

Paralelamente associado à adesão ao serviço rádio móvel, assistimos o aparecimento de novos serviços que em muitos casos baseiam-se no tráfego de pacotes. No entanto, embora tenha sido prevista a utilização do GSM para tráfego de pacotes, este foi concebido essencialmente para o tráfego de voz. Isso levou ao desenvolvimento do GPRS (*General Packet Radio Service*) e EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), sistemas direccionados para tráfego de pacotes no GSM [2, 3].

Com o objectivo de acompanhar a evolução da Internet, o acesso eficiente a serviços multimédia é providenciada com o aparecimento do UMTS, vulgarmente chamada de 3ª geração, cuja normalização iniciou na segunda metade dos anos 90 [4]. O UMTS para além do objectivo de ser um sistema universal por excelência, visava colmatar a deficiência do GSM no que se refere ao tráfego de pacotes incluindo a ampliação em larga escala de débitos suportados. O UMTS foi projectado para atingir débitos de 2

Mbps, mas graças ao HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) esperam-se a curto prazo débitos na ordem do 12 Mbps [4].

A evolução das comunicações móveis aponta no entanto, para o desenvolvimento de sistemas com a capacidade para fornecer largura de banda da ordem da fornecida pelas *Wireless LAN*, ordem de dezenas de Mbps, mas em ambientes de elevada mobilidade. Estas são as características apontadas para a componente de banda larga dos sistemas chamados da 4ª geração. De entre as tecnologias concorrentes para o suporte destes sistemas, o *Multi Carrier Code Division Multiple Access*, o MC-CDMA, é um dos sérios candidatos, pela sua robustez no canal banda larga com desvanecimento [5].

Das características inerentes às redes rádio móvel, a manutenção do desempenho da rede constitui uma das tarefas mais importantes na perspectiva dos fornecedores de serviço. A manutenção e/ou o melhoramento de uma rede sem fios em geral e rádio celular em particular, pode ser feita de três formas. A primeira é a conveniente cobertura da parte rádio, monitorizando a rede com frequência e guardando as medidas para análise. A segunda tem a ver com o planeamento dos aspectos a nível de rede como são os casos de algoritmos de *Handover*, o controlo de potência etc. A terceira é a gestão do sistema de forma adaptativa. A gestão adaptativa requer uma monitorização da rede em tempo real, observando os indicadores de qualidade e executar métodos de decisão instantâneos, tanto na parte rádio como no que refere aos parâmetros de rede apontados anteriormente. Na verdade, a optimização na gestão de um sistema sem fio depende essencialmente na resposta instantânea às variações das condições do sistema, quer seja na natureza e quantidade de tráfego, na entrada e saída de utilizadores, quer seja na variação das condições do canal rádio a que eles estejam associados.

Como referido acima, a gestão dinâmica de recursos com fins de optimização inclui decisão tempo real de aspectos relacionados com o controlo de potência, *Handover*, controlo de admissão e da carga de tráfego no sistema, *scheduling* de pacotes etc. Associado a tudo isso inclui-se a tarefa de satisfazer utilizadores, fornecendo a Qualidade de Serviço (QoS) esperado sendo que o conceito de QoS varia de aplicação para aplicação.

A motivação para este trabalho foi, dentro dos aspectos que condicionam o desempenho da rede, desenvolver algoritmos de *scheduling* de pacotes para sistemas MC-CDMA modo TDD, onde a priorização de pacotes é feita com a combinação de medidas do estado da ligação rádio com os requisitos de serviço associado ao tráfego dos utilizadores. Neste trabalho é proposto um algoritmo de priorização de pacotes simples,

em que a função de priorização combina parâmetros que se relacionam com os requisitos de qualidade de serviço, nomeadamente o atraso na fila e o taxa de erros, com a medida da robustez da ligação rádio, nomeadamente o SIR. O algoritmo proposto é comparado com algoritmo de *scheduling* proposto pela 3GPP para o HSDPA com o objectivo de maximizar o *throughput* da célula [6, 7].

1.2. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada conforme se descreve a seguir.

No capítulo 2 apresenta-se brevemente a evolução das comunicações móveis. Apresentam-se também as técnicas que poderão ser usadas no sistema de acesso da componente de banda larga das redes da 4ª geração. O projecto MATRICE, projecto Europeu da IST, cujos estudos com base na tecnologia MC-CDMA pretende ser uma proposta para a componente de banda larga para as redes da 4ª geração, é igualmente introduzido neste capítulo. De igual modo apresenta-se neste capítulo a realidade actual de múltiplos sistemas rádio, de acordo com as finalidades do utilizador final e a visão da ITU-R no que respeita à evolução destes sistemas e o posicionamento dos sistemas da 4ª geração relativamente às demais tecnologias. Segue a apresentação das características expectáveis dos sistemas da 4ª geração incluindo os cenários previstos para a sua utilização e as características dos terminais. Neste capítulo de evolução das comunicações móveis, apresenta-se também os serviços que muito provavelmente deverão estar associados aos sistemas sem fio num futuro relativamente próximo.

No capítulo 3 apresentam-se os modelos de simulação a nível de sistema e as opções tomadas relativamente ao simulador implementado para o estudo de métodos de alocação dinâmica de recursos nas redes 4G baseado no MC-CDMA. Descrevem-se essencialmente as interfaces do simulador de sistema com a camada física e uma interface desenvolvida para a utilização do simulador com tráfego IP real.

No capítulo 4 é apresentado o algoritmo de *scheduling* de pacotes desenvolvido, que se baseia na sensibilidade dos aspectos da qualidade de serviço requeridos pela aplicação do utilizador e da qualidade do canal rádio de cada utilizador. Descreve-se também o a estrutura completa usada de gestão de recursos rádio onde se insere o *scheduler*. São apresentados resultados do desempenho obtidos com o algoritmo proposto e estes resultados são comparados com os do algoritmo de *scheduling* que maximiza o

throughput do sistema. Os resultados são comparados em termos da satisfação do utilizador bem como também em termos do *throughput* da célula.

No capítulo 5 é feita uma análise ao trabalho efectuado e apresentam-se as conclusões obtidas, bem como algumas sugestões de trabalho futuro.

1.3. Contribuições

Este trabalho pretende ser um contributo na área de gestão de recursos rádio nos sistemas de comunicação móveis celulares baseados em MC-CDMA. Dada à complexidade do sistema MC-CDMA e aos vários aspectos associados à gestão de recursos rádio, este trabalho foca-se no *scheduling* de pacotes, sendo que este *scheduler* está inserido numa solução completa de gestão de recursos que inclui distribuição de potência, modulação adaptativa e ARQ híbrido. Este trabalho tem os seguintes contributos à comunidade científica: [8] na geração de tráfego em simulação de sistemas móveis; [9] na modelação a nível de sistema baseado em MC-CDMA; e [10] com a proposta de um *scheduler* de pacotes para sistemas MC-CDMA.

2. Definição do cenário para os sistemas da 4ª geração

Este capítulo apresenta o cenário provável associado aos sistemas da 4ª geração. O cenário é apresentado tanto a nível de serviços e aplicações que irão compor os sistemas da 4ª geração, bem como nas técnicas que lhe servirão de suporte. Na secção 2.2. apresentam-se os aspectos fundamentais dos sistemas existentes actualmente e o posicionamento da componente de banda larga do sistema que se prevê vir a ser um sistema da 4ª geração. Na secção 2.3. é feita uma abordagem às características fundamentais das redes da 4ª geração, incluindo serviços e aplicações e as técnicas de transmissão e acesso que serão o suporte da componente de banda larga. As características da tecnologia de acesso baseado em MC-CDMA proposto pelo projecto MATRICE, onde incidem os resultados técnicos que são apresentados nesta dissertação, são apresentadas na secção 2.4. . Na 2.5. é feita um resumo dos pontos apresentados neste capítulo.

2.1. Enquadramento

Nos dias de hoje é patente a emergência de um número variado de sistemas rádio, associados a diferentes aplicações, dependente da largura de banda, alcance ou grau de mobilidade. Esta diversidade de sistemas rádio e sua popularidade emergente faz prever que os utilizadores e os fornecedores de serviços, tenderão a utilizar o sistema de acesso mais adequado à aplicação pretendida. Seguindo esta evolução, a antevisão aponta para a tendência de que no futuro os vários sistemas rádio, para diferentes finalidades e com

características específicas, sejam agregados num sistema conjunto de forma a vir a constituir um ambiente de interoperabilidade.

Paralelamente a este cenário de complementaridade de sistemas de acesso, alguns grupos da comunidade científica propõem novas interfaces de acesso rádio que se pretenda vir a ter capacidade de fornecer grandes larguras de banda, da ordem das fornecidas actualmente pelas WLANs, mas num ambiente de elevada mobilidade, complementando a capacidade associada aos sistemas 3G, onde se insere o UMTS. Estes novos sistemas pretendem contribuir para aquilo que poderá vir a ser a componente de banda larga dos sistemas móveis da quarta geração (4G). O projecto MATRICE, onde este trabalho se insere, introduz uma nova interface rádio baseada em MC-CDMA, com o objectivo de se atingir grandes larguras de banda num ambiente de elevada mobilidade.

2.2. O cenário de múltiplos sistemas rádio

Várias tecnologias de acesso estão actualmente a emergir e a evoluir. Paralelamente aos sistemas das comunicações móveis chamados de segunda geração (2G) e aos recém-chegados terceira geração (3G), os sistemas LAN sem fios de banda larga (WLAN) tais como a HIPERLAN/2 e IEEE 802.11, e sistemas de radiodifusão digital áudio (DAB) e radiodifusão digital vídeo terrestre (DVB-T) tornam-se cada vez mais comuns. O Bluetooth vem sendo amplamente utilizado na ligação entre equipamentos a curta distância. No cenário dos sistemas de acesso fixos, o xDSL, em particular o ADSL, vem aumentando de forma significativa a largura de banda do utilizador doméstico e empresarial. Os sistemas móveis de terceira geração oferecem cobertura a nível global a ritmos de transmissão até 2Mbps e serviços orientados ao transporte de pacotes, sendo que técnicas como o HSDPA vêm aumentar o desempenho da célula no UMTS para valores superiores a 10 Mbps, e a tendência segundo o grupo LTE da 3GPP [11], é para aumento nos próximos anos para valores na ordem de dezenas de Mbps. Os sistemas WLANs por seu turno têm actualmente capacidade para largura de banda da ordem de dezenas de Mbps, embora num ambiente de relativa curta distância e baixa mobilidade e esperam-se evolução para capacidades da ordem de centenas de Mbps num futuro muito próximo. Este último sistema é aplicado em redes privadas e grupos restritos de acesso público, em cenário *hot spot*, sendo um complemento dos sistemas rádio celulares (i.e, GSM e IMT2000/UMTS).

Seguindo esta tendência, a previsão do grupo normalizador ITU-R [12] é que no futuro os serviços rádio serão caracterizados por um acesso móvel global através de um ou múltiplos terminais. Os operadores, que actualmente já fornecem mais do que um único tipo de serviço e com base em mais do um tipo de sistema de acesso, quererão ampliar sua oferta disponibilizando um agregado de serviços, baseando-se nesse combinado de tecnologias. Este grupo de serviços deverá estar agregado às suas redes celulares, WLAN, radiodifusão digital, transmissão via satélite e outras tantas tecnologias de acesso, em função do mercado e de regulamentações.

Embora as tecnologias como a WLAN e o UMTS sejam constantemente melhoradas aumentando suas capacidades, prevê-se a necessidade de haver um novo conceito de interface rádio que potencialize grandes larguras de banda, na ordem de valores conseguidos actualmente pelas WLANs, mas associado a um ambiente de elevada mobilidade. Estas deverão ser as características fundamentais associadas à componente de banda larga das redes da 4ª geração.

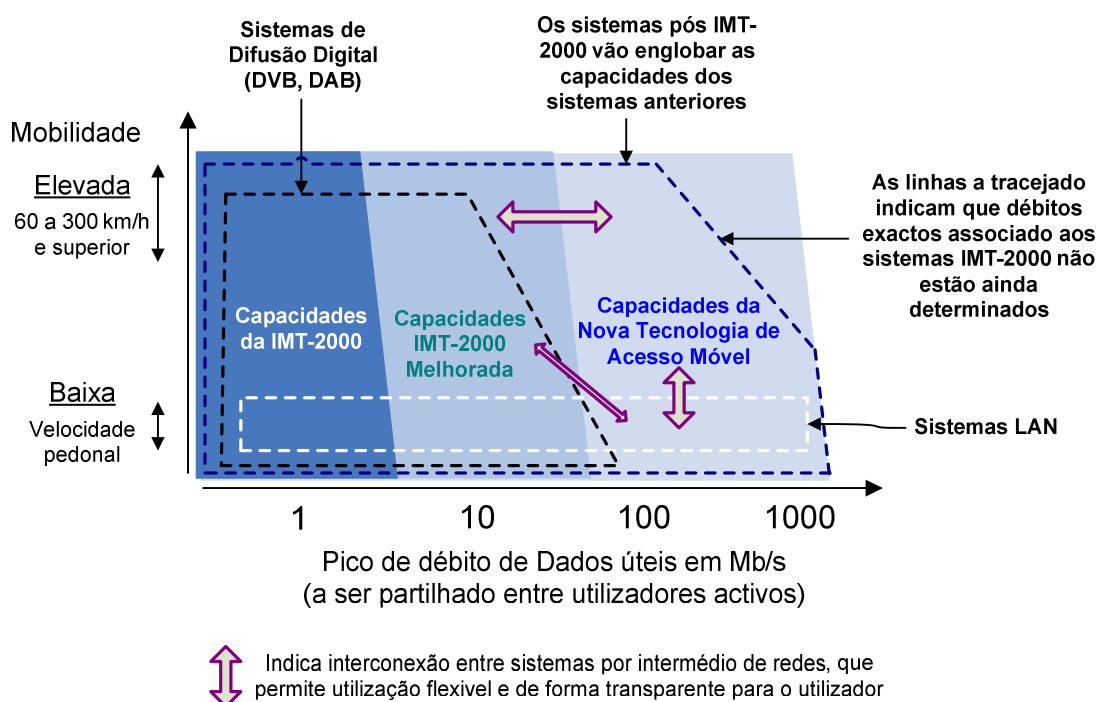


Figura 2-1: Cenário de complementaridade associado aos sistemas de comunicação móveis IMT-2000 (3G).

A Figura 2-1 representa o posicionamento dos vários sistemas de acesso rádio de acordo com o débito que fornecem e o grau de mobilidade que poderão suportar, onde se destaca o posicionamento dos sistemas Pós-3G. A visão apresentada é a do ITU-R [12],

que aponta para um cenário futuro de complementaridade entre sistemas. Esta ideia vem em oposição ao cenário de versatilidade nas tecnologias mais avançadas, em que o sistema de geração posterior, neste caso a 4ª geração, deverá ser o mais versátil substituindo as demais existentes. Este cenário de complementaridade apontado pela ITU-R promove uma interoperabilidade entre sistemas em vez de substituição ou re-adaptação de tecnologias já existentes.

A combinação adequada destas várias tecnologias poderá representar uma plataforma amplamente poderosa e flexível para suportar os requisitos dos serviços e aplicações futuras. Os dois parâmetros, ritmo de transmissão suportado e grau de mobilidade, conforme a Figura 2-1, serão os factores chave na escolha por parte da operadora e do utilizador, do sistema rádio a operar. A escolha da tecnologia e serviço passível de ser oferecido irá depender do equipamento terminal, o ambiente de propagação e a aplicação solicitada pelo utilizador.

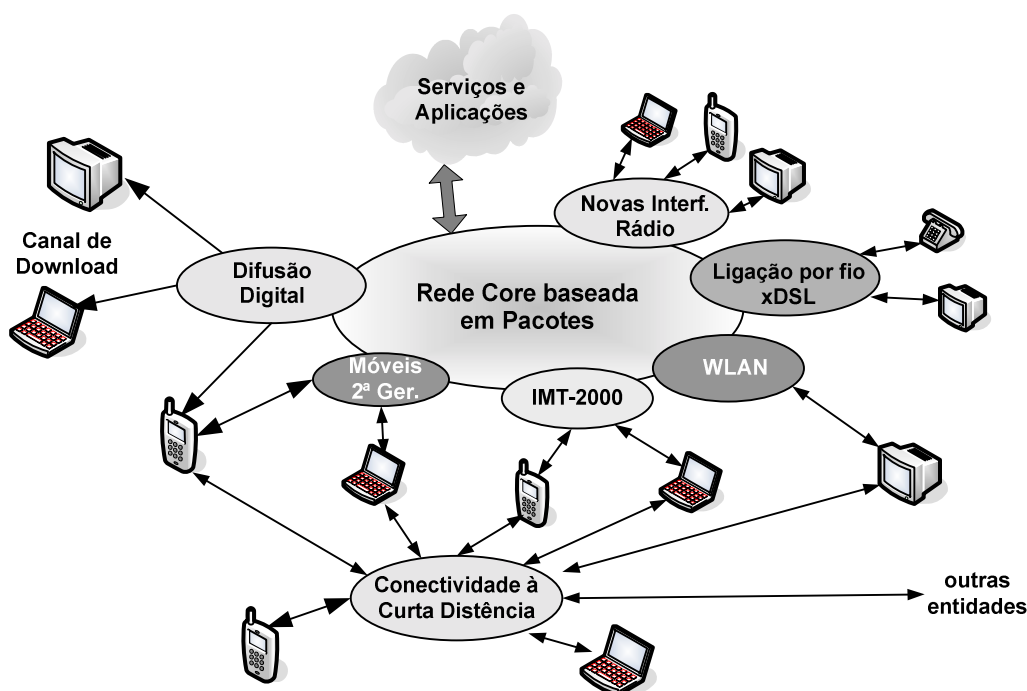


Figura 2-2: Futuras redes dos sistemas Pós-3G incluindo interoperabilidade com uma variedade de potenciais sistemas de acesso.

Este conceito futuro que poderá ser traduzido por “Ligado de forma óptima em qualquer sítio e a qualquer hora” poderá então ser possível com o englobar de uma variedade de sistemas de acesso numa rede core comum baseado em pacotes, como é apresentado na Figura 2-2.

2.3. Características dos sistemas da 4ª geração

Uma das características previstas para os sistemas Pós-3G é englobar largura de banda elevada e capacidade de resposta aos requisitos de serviço variados. Estes sistemas deverão de igual modo fornecer débitos elevados a baixo custo quando comparados com os sistemas de segunda e terceira geração. O sucesso comercial para as redes Pós-3G dependerá essencialmente da disponibilidade de serviços atractivos para os utilizadores. Sucesso comparável ao atingido pelo serviço de voz móvel só será realizável se estes sistemas tiverem capacidade de fornecer serviços de dados a preços atractivos. Os futuros terminais deverão incorporar grande parte de funcionalidades encontradas hoje em dia nos equipamentos de processamento de informação, preservando características importantes como elevada capacidade de personalização, melhorando a qualidade de vida do utilizador.

2.3.1 Serviços e aplicações

A Eurescom [13], englobando uma visão conjunta das organizações de telecomunicações pela Europa, identificou as directivas a seguir no projecto de sistemas Pós-3G, por forma a garantir que os sistemas móveis futuros venham de encontro com as necessidades e expectativas do utilizador. Estas directivas, relacionadas com os serviços e aplicações, são descritas nas subsecções que se seguem.

2.3.1.1 Tipos de aplicação

Os serviços e aplicações a serem considerados no projecto de sistemas de 4ª geração deverão basear-se na definição de um cenário genérico. Quatro categorias de aplicações vêm sendo desenvolvidas para os sistemas Pós-3G [14]. As categorias são descritas a seguir.

- Personalizadas/localizadas. Serão fornecidos aos utilizadores informações como noticiário geral, informações financeiras, guias de localização, comércio móvel e serviços de viagem. Estes serviços serão fornecidos baseados num perfil pessoal que reflecte os interesses do utilizador, associados à hora e lugar;
- Serviços de comunicação e aplicações. Estes serviços envolvem *Short Message Service* (SMS), e-mail, vídeo-conferência, etc. Grande parte destes serviços estão

já disponíveis nas redes actuais, mas serão melhorados em termos de segurança e comodidade;

- Serviços organizacionais. Estes serviços estão associados às capacidades dos *Personal Digital Assistant* (PDA), por exemplo o câmbio de moedas baseados na localização do utilizador, e outros serviços relacionados com a gestão pessoal. Outro serviço que se prevê de grande potencial é o de comércio móvel (M-commerce). M-commerce é o serviço que torna possível a compra de produtos via terminais móveis. Neste serviço, a compra seria debitada na conta do serviço rádio-móvel do utilizador;
- Serviços de entretenimento. Nestes fazem parte dois tipos de serviços que começam hoje em dia a ser frequentes. São por um lado os serviços interactivos multimédia suportados pelos terminais móveis digitais e, por outro, os serviços de difusão digital. A linha de separação entre estes dois tipos de serviços vem desaparecendo, sendo solicitado cada vez mais serviço interactivo multimédia para grupos de utilizadores móveis. Exemplos destes serviços são o noticiário e trechos de eventos desportivos, músicas e jogos multi-utilizador.

2.3.1.2 Ambiente de suporte ao fornecimento de serviços

Este ponto indica as directivas que devem ser seguidas no projecto e desenvolvimento das camadas intermédia e das aplicações. Deve-se ter em conta que os serviços serão acedidos através de um número variado de equipamentos, como parte integrante de uma rede de área pessoal. O serviço, visto da camada intermédia, deverá ter associado um ganho no contexto das redes heterogéneas e deve incorporar formas de adaptação dinâmica às variações do contexto e preferência do utilizador.

Os objectivos principais das directivas do ambiente de suporte são:

- Suportar o contexto pessoal e perfil do utilizador, garantindo que a protecção de dados e privacidade do utilizador é respeitada;
- Serviços comuns: desenvolver protocolos avançados que suportem *handover* na vertical, ou seja entre plataformas;
- Possibilitar e facilitar acesso a serviços fornecidos por terceiros;
- De uma forma lata, suportar adaptabilidades em todos os níveis;

- Idealizar terminais configuráveis baseados em software rádio;
- Basear-se em plataformas abertas programáveis;
- Possibilitar o acesso de forma de comum;

2.3.1.3 Acesso Comum

A ideia de acesso comum era um dos objectivos do GSM que pretendia ser de acesso global através do *roaming* global. Este conceito deve ser transportado para as redes futuras mas num contexto ainda mais abrangente, para que o utilizador possa aceder a uma gama variada de serviços e sistemas, com o mínimo de entradas. Uma vez que sistemas como WLAN, UMTS e redes *ad-hoc* estão optimizados para certos cenários e aplicações, será vantajoso em termos de custos para o utilizador se estas entidades puderem integrar protocolos de mobilidade que suportem *roaming* entre sistemas.

O Acesso Comum é caracterizado pelos seguintes pontos:

- Integração numa rede *core* comum baseada em IP;
- Mobilidade de equipamento, mobilidade pessoal, mobilidade de serviço e mobilidade de sessão. É um requisito haver protocolos avançados que suportem mobilidade a todos os níveis;
- Alocação dinâmica de recursos a todos os níveis para optimizar a utilização dos recursos;
- Adaptabilidade e capacidade de re-programação dos componentes de rede;
- Acesso universal (plataforma, lugar) de forma comum, através por exemplo de um cartão SIM.

2.3.1.4 Qualidade de serviço

A Qualidade de Serviço (QoS) final entre dois extremos vai ser determinada pela combinação da QoS de todos os pontos intermédios e a aceitação do serviço prestado por parte do cliente dependerá essencialmente somente deste factor. O operador deverá identificar por isso a seguinte terminologia: Requisitos de Serviço do Utilizador,

Percepção de QoS pelo Utilizador, QoS Oferecido e QoS Actual. Cada um destes pontos é descrito a seguir:

- Requisito de serviço do utilizador é baseado na noção que o utilizador terá da disponibilidade de serviço a qualquer instante e em qualquer lugar;
- Percepção de QoS pelo utilizador indica se o utilizador estará ou não satisfeito com a QoS dos serviços que lhe são disponibilizados, isto é, depende muito das expectativas e percepção por parte do utilizador da QoS;
- QoS oferecido expressa-se na linguagem do operador e é indicado de acordo com o serviço. Deve preencher as expectativas de QoS por parte do utilizador e é obrigatório que preencha o *service level agreement*;
- QoS actual mede a eficiência do serviço fornecido pela operadora. São necessários indicadores adequados de medida do desempenho para monitorizar este parâmetro.

2.3.1.5 Facturação inteligente

A facturação inteligente é um serviço actualmente em desenvolvimento e não é apontado unicamente como de interesse por parte da operadora para maximizar o retorno ou lucro. Este serviço também é encarado como parte de grupo de serviços que deverá ser prestado na perspectiva do utilizador. A Caixa Geral de Depósitos lançou recentemente um serviço onde possibilita o pagamento de algumas contas, nomeadamente refeição nas cantinas das Universidades através do saldo pré-pago dos telemóveis.

Uma vez que no cenário Pós-3G definem-se vários meios de comunicação e pretende-se suportar uma gama variada de serviços e de forma flexível, estes irão obviamente adicionar alguma complexidade no processo de facturação, o que faz da facturação uma necessidade definida. Por parte do operador os requisitos na facturação poderão incluir formas de facturação para suportar tráfego IP (quantidade e classe de tráfego), flexibilidade no cálculo do custo da qualidade de serviço a disponibilizar ao utilizador final, e detecção instantânea de fraude.

2.3.1.6 Injeção / rejeição de serviços baseados na localização

Nos dias de hoje, cada vez menos os destinos são procurados em mapas, passando estas buscas para um PC, PDA, ou mesmo um terminal móvel com perguntas tipo “para onde devo ir agora?” ou “onde devo ir divertir-me com os meus amigos?”. O processo de disponibilizar serviços baseados na localização do cliente, *injectando* informações e serviços para que sejam seleccionados por parte do cliente de acordo com o seu interesse, determina uma forma de disponibilizar serviço ao utilizador final.

A forma de *injectar* estes serviços deve ser complementada com o perfil pessoal do utilizador. O perfil pessoal é actualizado pelo cliente, baseando a operadora e/ou o fornecedor de serviços nas suas preferências comuns, garantindo que os serviços disponibilizados são personalizados. O perfil do utilizador será armazenado numa base de dados pelo fornecedor de serviços e a informação/serviço será continuamente *injectado* ao subscritor, dependente do contexto em que está inserido, isto é, com base na hora e no lugar. Se o utilizador não estiver interessado no serviço *injectado* este será *rejeitado*. Estes serviços deverão estar disponíveis quer no contexto *indoor* (centros comerciais, hipermercados, feiras etc.), quer no contexto *outdoor*, o que não se passa com as redes actuais.

Esta estratégia inclui o uso do IPv6 no encaminhamento de pacotes para o terminal móvel, uma vez que este protocolo inclui busca de localização.

2.3.2 Portadores rádio de serviços

A variedade de potenciais serviços e aplicações apresentados na secção 2.3.1 e o crescente número de utilizadores dos sistemas sem fios vai fazer aumentar significativamente a largura de banda fornecida pelos sistemas futuros. Nesta secção apresenta-se os requisitos dos portadores de serviço para a interface rádio associado aos sistemas da 4ª geração a serem associados aos parâmetros QoS como ritmo de dados, taxa de erros e atraso.

As recomendações da ITU-R [12] fornecem uma visão a alto nível para as novas potencialidades apontadas para os sistemas pós-3G. Estes sistemas irão suportar uma gama variada de requisitos rádio para serviços simétrico, assimétrico e unidireccional. Ião também fornecer capacidade de gestão de diferentes níveis da qualidade de serviço de forma a conseguir um transporte eficiente de serviços baseados em pacotes. Vários

serviços multimédia apresentam características assimétricas, essencialmente com débitos elevados na direcção do utilizador e muitos requerem portadores de serviços assimétricos e *multicast*. As novas interfaces de acesso rádio irão suportar uma gama variada de débitos de acordo com requisitos económicos e de serviço em ambientes multi-utilizador com valores de débitos máximos perto dos 100 Mbps para mobilidade elevada e 1Gbps para ambientes de reduzida mobilidade, neste último caso em acessos de redes locais. Estes são os débitos alvo em estudo e investigação, de acordo com a ITU-R, e não deverão ser encarados como definitivos. A flexibilidade deverá ser encarada como forma de permitir negociação de portadoras de serviços rádio no futuro para aplicações ainda desconhecidas. Os débitos apresentados correspondem ao valor máximo e serão partilhados entre utilizadores activos no sistema. O valor de pico de *Throughput* para um utilizador individual vai depender de vários parâmetros incluindo o número de utilizadores activos, características de tráfego, parâmetros de serviço, cenário, disponibilidade do espectro e as condições de propagação e interferência.

Para além destes requisitos gerais, apresentam-se quatro tipos de portadores de serviço, baseados na visão da actual rede 3G [4]. Um portador de serviço rádio é encarado como um tipo de ligação entre o utilizador e a rede core que inclui uma lista de critérios QoS a serem obedecidos, tais como: atraso, débito associado, *jitter*, BER, dependente da aplicação. As aplicações negoceiam as características dos portadores mais apropriados para o seu suporte. A negociação é iniciada pela aplicação e o conjunto de parâmetros deverá ser seleccionado para que os procedimentos de re-negociação sejam simples e sem ambiguidades. Os parâmetros usados deverão facilitar procedimentos de acerto do ritmo de dados. Os quatro tipos de portadores de serviço rádio são apresentados a seguir.

- Portador rádio de serviço tempo-real: é fornecido pela interface rádio para aplicações tempo real como é o caso de videotelefonia. Este tipo de serviço requer atrasos de transmissão muito baixos e ausência de *jitter* entre os nós finais. Por conseguinte a interface rádio destes sistemas deverá garantir atrasos de transmissão muito baixos e ausência de *jitter*, mesmo quando ritmo de dados oferecido aumenta repentinamente de modo significativo. A interface terá também que manter o BER abaixo de um valor limiar, dependente da aplicação, para que a qualidade estipulada seja atingida sem que haja retransmissão de pacote. Para aplicações como a videotelefonia por exemplo, espera-se que um ritmo de bits garantido de centenas de kbps seja suficiente;

- Portador rádio de serviço próximo de tempo-real: é fornecido para as aplicações com características muito próximas das aplicações tempo-real, como é caso de *streaming* de vídeo ou áudio. Estas aplicações requerem atrasos limitados e *jitter* muito baixo entre os nós finais. Por exemplo, as tramas de vídeo devem chegar com *jitter* baixo o suficiente para que sejam processados e apresentados a um ritmo constante. Por conseguinte, a interface rádio deverá garantir um atraso máximo e *jitter* baixo. O BER recebido terá que ser mantido abaixo de um valor limiar para que a qualidade estipulada seja atingida sem que haja retransmissão de pacotes. Espera-se que ritmo de bits com valores de pico de alguns Mbps e valor garantido de centenas de kbps sejam suficientes para aplicações como o *streaming* vídeo;
- Portador rádio de serviço interactivo não tempo-real: será fornecido para as aplicações como WWW *browsing*, ou videojogos. Estes tipos de aplicações requerem somente suporte para elevado ritmo de dados e atraso máximo entre nós finais, que poderão neste caso ser relativamente superiores das aplicações anteriores. A interface poderá incluir o ARQ e deverá manter o BER residual e um o PER (Packet Error Rate) residual, após todas as transmissões. Para minimizar o número retransmissões de pacotes a nível dos protocolos de rede (exemplo do TCP), o PER deve ser mantido abaixo de um valor máximo, que dependerá da aplicação;
- Portador rádio de serviços não tempo-real e de segundo plano: será fornecido para aplicações como Email ou FTP. Estes tipos de aplicações requerem somente suporte para elevado ritmo de dados. Não existem confinamentos de atraso entre os nós finais. A interface ar poderá executar o ARQ e deverá manter o BER residual, PER residual e ritmo de perdas de pacotes abaixo de um valor máximo, dependendo da aplicação, para minimizar o número de retransmissões de pacote a nível dos protocolos de rede.

2.3.3 Terminais

Acredita-se que no futuro não haverá uma aplicação universal para a comunicações, mas sim uma variedade de aplicações de comunicação que estarão a operar em harmonia, dando suporte aos utilizadores na sua vida normal [15]. Os equipamentos de comunicação e computação pessoais estão a tornar-se cada vez mais específicos para determinadas tarefas, fazendo com que haja necessidade de comunicação entre eles

para suportar o conceito de semelhança na conectividade. Esta necessidade levou ao conceito de redes *ad-hoc* e da conectividade Bluetooth.

Uma vez que os terminais acompanham o utilizador, especificamente à mão ou no vestuário, estes dispositivos deverão ser objectos com interfaces práticos, e não o centro de atenção do utilizador. Estes dispositivos deverão usar extensivamente o reconhecimento de voz.

Independentemente de serem dispositivos universais ou para tarefas específicas, o ritmo de dados, ou seja a capacidade terá um impacto no design do equipamento. Um ecrã maior que o dos actuais terminais móveis é necessário para a apresentação dos *streams* de vídeo de elevado débito para que se retire proveito da qualidade de serviço da aplicação. Por conseguinte uso de terminais maiores incluirá benefícios adicionais como a aplicação das técnicas de MIMO (Multiple Input Multiple Output) na robustez do sistema. Uma outra forma de adicionar antenas múltiplas aos terminais é através de invólucros de transporte.

2.3.4 Componente de banda larga das redes da 4ª geração

2.3.4.1 Cenários de utilização

Alguns ambientes foram identificados como sendo de relativa densidade populacional e associados a relativa mobilidade, sendo por isso apontados como cenários alvo das tecnologias pós-IMT-2000. Estes ambientes estão agrupados nas seguintes categorias:

- Redes de transporte e as áreas associadas. Estes ambientes estão associados a mobilidade que poderão atingir velocidades até 300 km/h. Estão incluídos neste grupo as redes de transportes Metropolitanos, Comboios, Aeroportos e de Autocarros;
- Zonas urbanas densas em termos populacionais e redes de estradas urbanas. Estes ambientes estão associados a mobilidades que poderão atingir os 120 km/h.

As zonas de grande concentração e associados a mobilidades do tipo pedonal ou estático como é o caso dos centros comerciais e escritórios também são também cenários alvos para estas novas tecnologias de acesso.

A cobertura esperada, pelo menos na fase inicial e de expansão, cinge a áreas isoladas com as características descritas acima, isto é, a cobertura irá ser focado a zonas específicas, devendo o UMTS complementar este sistema com a cobertura a nível nacional.

2.3.4.2 Possíveis técnicas a serem usadas na componente de banda larga dos sistemas da 4ª geração

No cenário da 4ª geração há uma necessidade de se desenvolver um novo conceito de interface rádio que possibilite dentro das limitações impostas pelo canal rádio, o suporte de ritmos de transmissão elevados com grau de mobilidade elevado e cobertura maior de que o actualmente suportados pelos sistemas WLAN. A Figura 2-1 mostra que os sistemas Pós-IMT-2000 estão localizados, pelas suas características, numa zona não coberta por nenhum dos outros sistemas.

Algumas tecnologias de acesso são candidatas à normalização das redes de 4ª geração e são propostas técnicas avançadas de forma a ser possível atingir estes objectivos. Estas técnicas são nomeadamente o OFDM, MC-CDMA, MIMO, e de uma forma mais abrangente o sistema de acesso deverá muito provavelmente englobar a combinação destas técnicas.

OFDM

A OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), é um caso particular da modulação multi-portadoras. A modulação multi-portadoras usa como princípio o facto de que um canal selectivo na frequência pode não afectar um sinal de banda larga se for seccionado em vários sinais de bandas inferiores, menores que banda de coerência do canal. A Figura 2-3 apresenta um espectro OFDM, em que um sinal de banda larga é seccionado em vários sinais de largura de banda inferior, em bandas ortogonais.

Embora a origem de aplicação das técnicas OFDM tenha sido entre os anos 1950 e 1960 [16], o seu sucesso nas comunicações era limitado pelo facto serem necessários demasiados moduladores / desmoduladores e uma largura de banda relativamente maior que a efectiva para transmitir o sinal. Técnicas de processamento relativamente recentes baseadas na transformada discreta de Fourier viabilizaram a implementação prática do

OFDM nos sistemas actuais. O banco de moduladores/desmoduladores é realizado com recurso a um módulo que efectua algoritmos de IFFT/FFT.

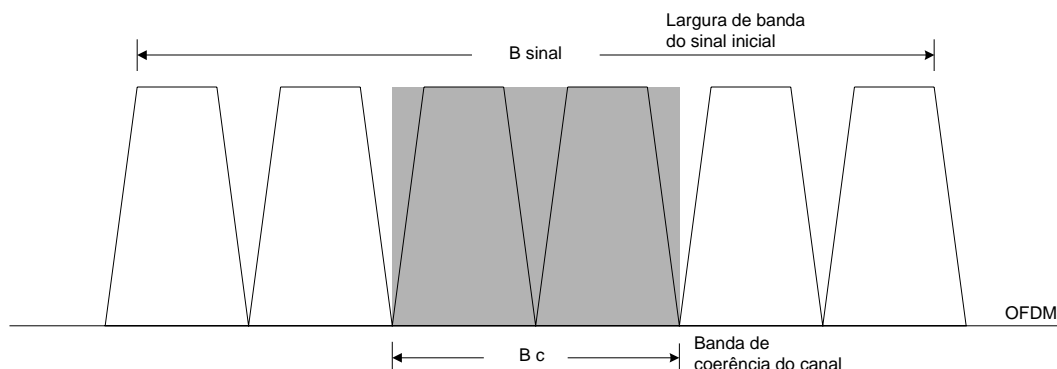


Figura 2-3: Princípio da modulação OFDM.

A Figura 2-4 apresenta um modulador (banco emissor) e um desmodulador (banco receptor) OFDM [16]. Da parte do modulador, os bits de dados são separados num buffer de bits paralelos onde sofrem de seguida uma formatação em símbolos complexos. Os símbolos complexos passam do domínio dos tempos para o domínio da frequência através do módulo de IFFT. O banco de dados correspondente a frequências paralelas ortogonais é passado para série e é adicionado um prefixo cíclico para eliminar interferência entre portadoras. No desmodulador efectua-se um processo inverso. No receptor utiliza-se um equalizador que confere a cada canal um factor multiplicativo. A equalização baseia-se na estimação de canal, que consiste na determinação de coeficientes complexos e equalizador simplesmente aplica factor multiplicativo complexo à saída do algoritmo que calcula a FFT no receptor estimação de canal.

Relativamente a TDMA e DS-CDMA, a técnica OFDM tem como principal vantagem a relativa simplicidade de equalização, factor importantíssimo para ritmos elevados em que os canais são de banda larga. O ajuste do número de portadoras é outra vantagem do OFDM, uma vez que corresponde a uma flexibilidade nos múltiplos ritmos de transmissão.

A OFDM é usada actualmente na difusão de televisão terrestre (DVB-T) e nas LAN sem fio na norma 802.11b e Hyperlan.

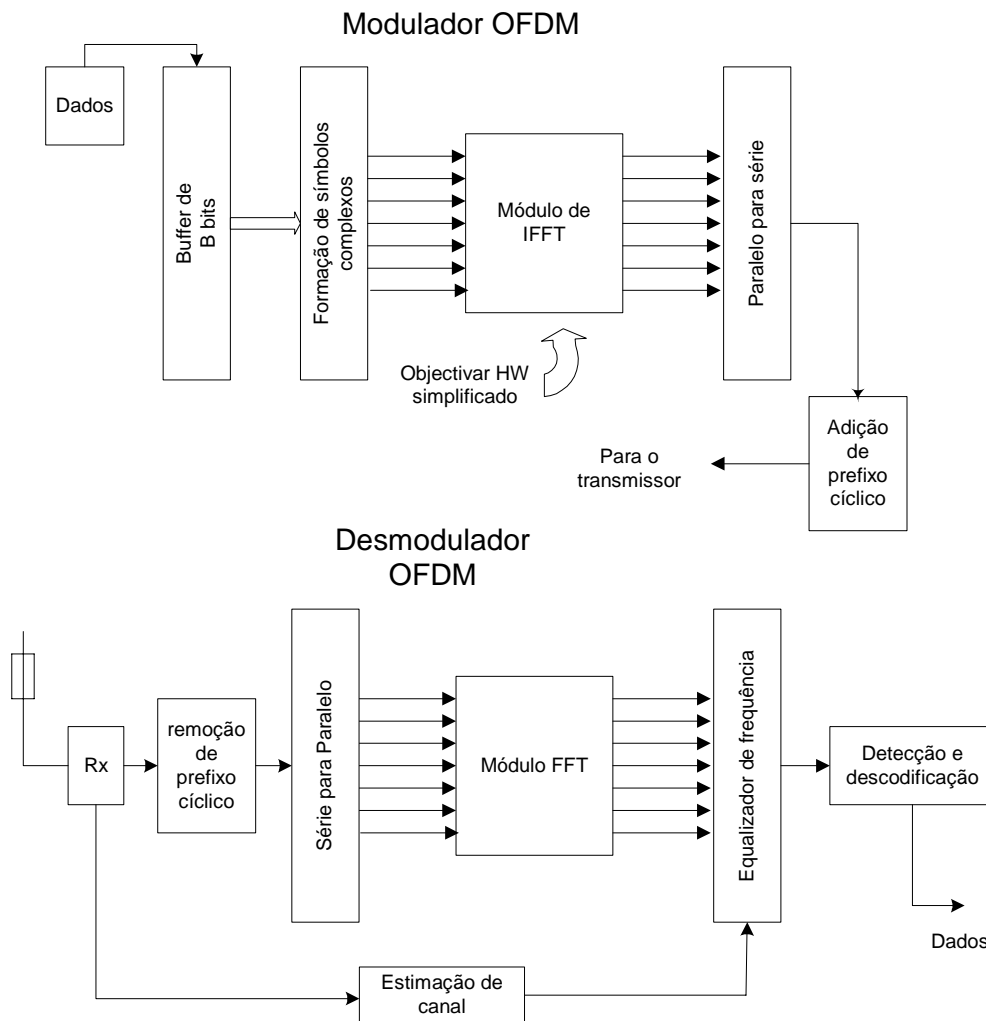


Figura 2-4: Modulador / Desmodulador OFDM.

MC-CDMA

O MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access) é uma tecnologia candidata à tecnologia de acesso para as redes de 4ª geração. Esta tecnologia combina as vantagens associadas ao OFDM e CDMA, obtendo efeitos da sinergia inerentes a cada uma, como a robustez contra o desvanecimento selectivo na frequência que afecta essencialmente sinais de banda larga e a elevada escalabilidade no ritmo de transmissão de dados associada ao CDMA [5, 17, 18].

A Figura 2-5 apresenta o emissor e o receptor MC-CDMA na sua forma mais elaborada. Do lado do emissor cada um dos M símbolos do utilizador k é espalhado entre os SF códigos e associados a cada uma componente de SF sub portadoras. A banda é dividida

em M grupos de SF sub portadoras. Depois de espalhar sinal e formatado a símbolos complexos, o sinal escalar é submetido a processamento IFFT. O grupo paralelo de sinal é transformado em série e é introduzido o período de guarda. No receptor é efectuado inverso, incluindo no entanto a equalização do canal entre o processamento FFT e a operação de desmodulação do sinal, processo inverso ao espalhamento.

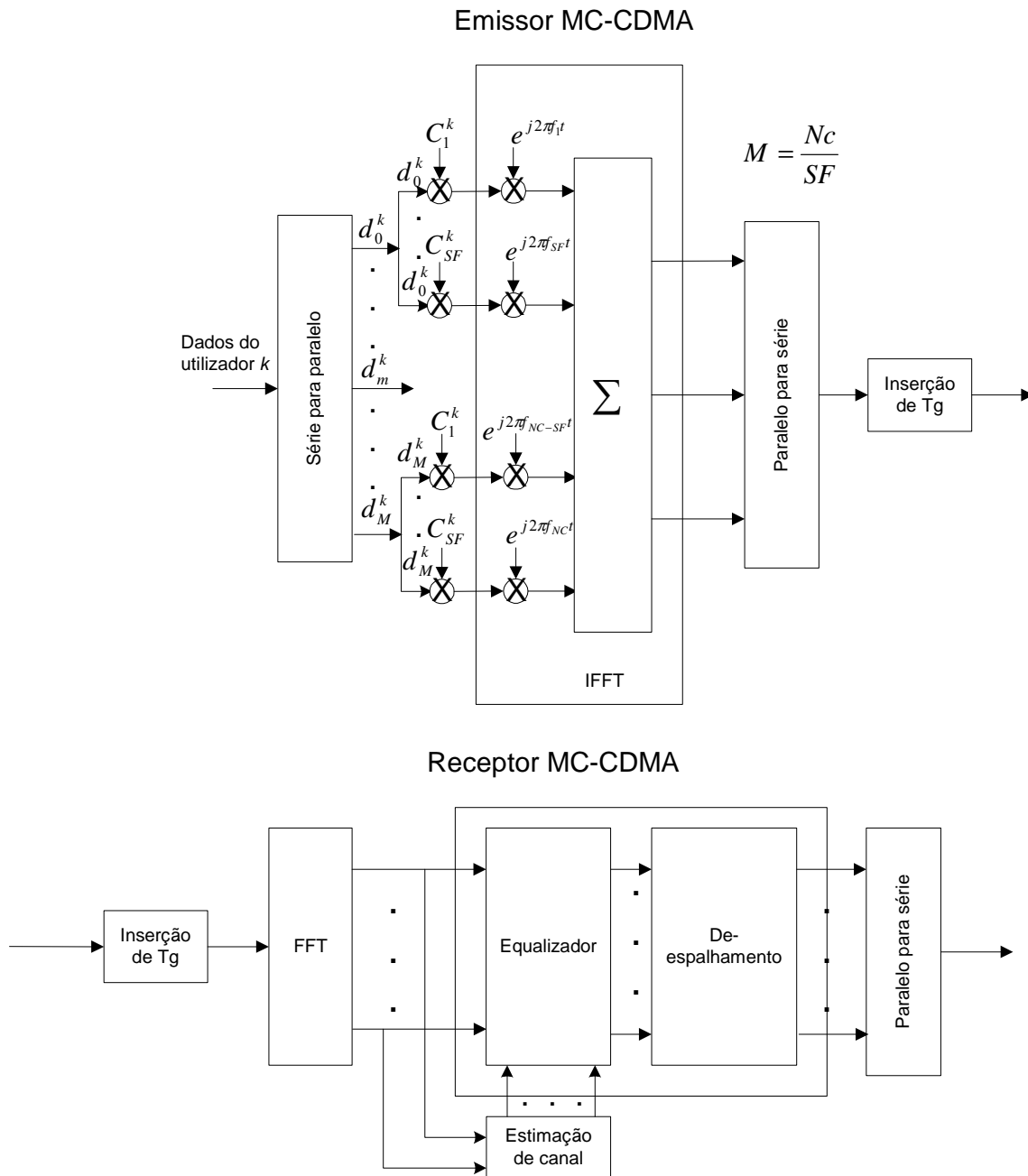


Figura 2-5: Emissor / receptor MC-CDMA.

Algoritmos avançados de estimação do canal e de detecção multi-utilizador são técnicas usadas no receptor MC-CDMA de forma a melhorar o seu desempenho.

A elevada complexidade associada a um número elevado de “dedos” no receptor Rake na recuperação de um sinal de banda larga em DS-CDMA é compensada com a técnica de processamento do OFDM, permitindo que o MC-CDMA seja um dos sérios candidatos à tecnologia de acesso para a componente de banda larga das redes da 4ª geração.

MIMO

MIMO (Multiple Input Multiple Output) é uma técnica usada com o objectivo aumentar a capacidade do canal rádio, através de um agregado de antenas tanto da parte do emissor como do receptor [19]. Na sua forma mais simplificada, o sistema de antenas múltiplas pode ser SISO (Single Input Single Output) onde é usado uma única antena na recepção e outra na transmissão, MISO (Multiple Input Single Output) onde é usado uma antena na recepção e múltiplas antenas na transmissão e SIMO (Single Input Multiple Output) onde é usado uma antena na transmissão e múltiplas antenas na recepção. A Figura 2-6 apresenta o diagrama de um sistema MIMO.

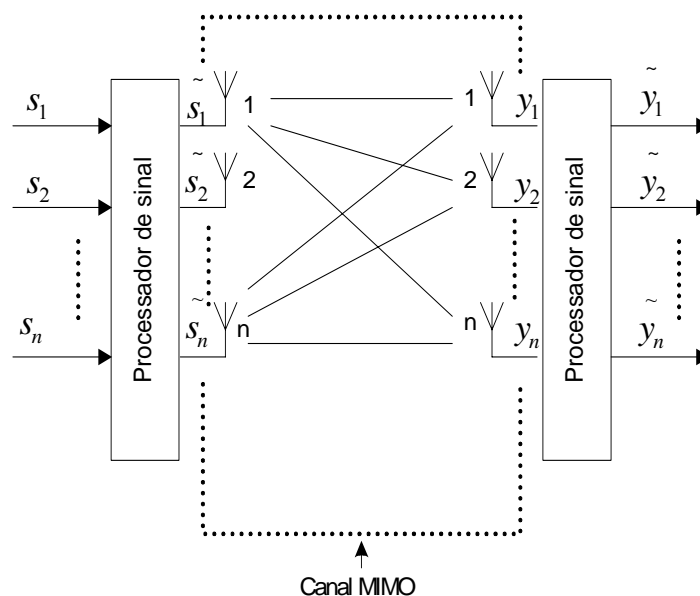


Figura 2-6: Diagrama de blocos de um sistema MIMO.

O aumento da capacidade do canal com os sistemas MIMO obtém-se de variados modos. Obtém-se ganho do agregado através da combinação coerente de múltiplas antenas na recepção, fazendo aumentar a relação sinal-ruído (RSR) na recepção. Se o canal é conhecido pelo emissor, pesos diferentes são dados a cada componente do agregado do emissor para que haja combinação coerente numa única antena do receptor, caso do MISO. Ganho na diversidade espacial é obtido quando réplicas do sinal são combinados nos componentes do agregado do receptor. Neste caso deverá haver uma distância mínima de coerência de forma a garantir componentes de desvanecimentos independentes nas diferentes antenas. Esta diversidade poderá ser aplicada tanto do lado do emissor como do lado do receptor. A técnica do MIMO poderá também ser usada para aumentar significativamente o ritmo de dados. Neste caso igual número de antenas será usado da parte do emissor e do receptor, e cada antena emissora transmitirá dados diferentes (S_1 a S_n na Figura 2-6) que serão colectados também por antenas diferentes no receptor (y_1 a y_n Figura 2-6) e a combinação resulta num aumento de capacidade do sistema. A discriminação espacial de utilizadores é outro ganho associado à técnica do MIMO, onde conhecido o canal, o emissor pode discriminar o ganho orientado no espaço.

2.4. Projecto MATRICE

2.4.1 Interface ar

O MATRICE é um projecto da IST cujo objectivo principal é propor e avaliar uma nova tecnologia de acesso rádio baseada no MC-CDMA. Com este desafio o projecto MATRICE investiga técnicas avançadas de processamento de sinal como é o caso de Estimação do canal, Detecção Multi-Utilizador, na camada física e alocação dinâmica de canais para gestão de recursos rádio na camada MAC. O projecto definiu como alvo atingir ritmos de dados por célula na ordem dos 100Mbps dependente obviamente do cenário e de condições de propagação [20].

De forma a facilitar a compatibilidade com o UMTS, a camada física desta interface ar tem aspectos muito próximos do UMTS. A interface ar do MATRICE é um sistema TDD que usa uma largura de banda de 50MHz [21]. De acordo com requisitos deste sistema e limitações por parte do espectro, a banda dos 5GHz aparece como escolha razoável para

estudos e operação desta interface. De qualquer forma a interface rádio deste sistema MC-CDMA é projectado por forma ser adaptável a largura de banda superior ou inferior a 50MHz, desde que a largura de banda seja múltipla de 5 MHz, que é a largura de banda usada no UMTS. Esta característica possibilita diferentes alocações no espectro e diferentes valores alvo de ritmo de dados da célula.

A trama MC-CDMA composta nos domínios de tempo-código-frequência, está dividida em três slots, com mesma duração de um slot do UMTS, em vinte e três grupos de trinta e duas sub-portadoras. Cada símbolo de dados está espalhado num grupo de sub-portadoras usando um de trinta e dois códigos de espalhamento ortogonais de comprimento trinta e dois [22].

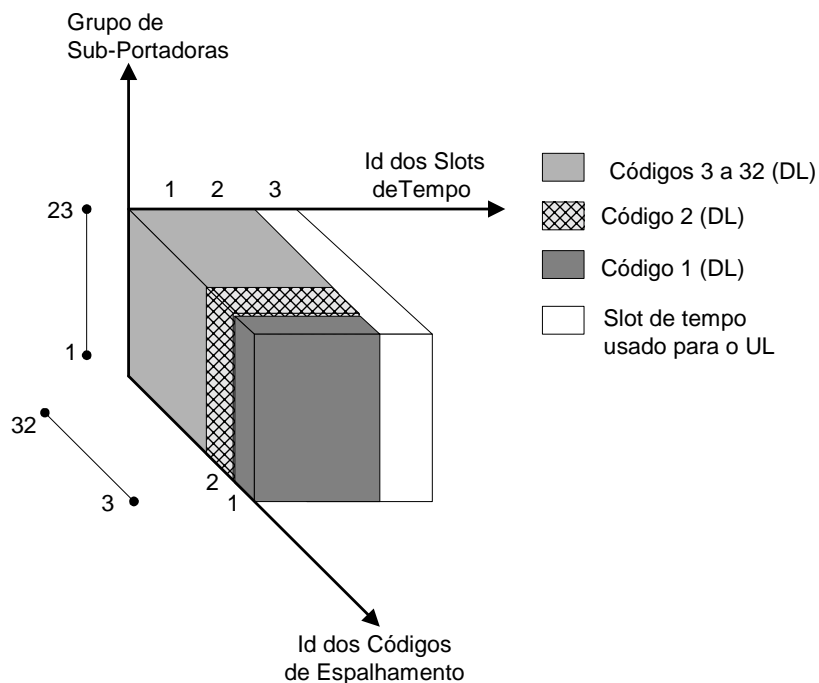


Figura 2-7: Trama MC-CDMA proposto para o projecto MATRICE no espaço Código-Tempo-Frequência.

2.4.2 Técnicas associadas

A interface ar do sistema do projecto MATRICE inclui técnicas de MIMO, OFDM, técnicas avançadas de processamento ligadas ao cancelamento de interferência, estimação do canal e detecção multi-utilizador.

2.4.3 Cenários alvo

Os cenários alvos de estudo no projecto estão de forma genérica incluídos no grupo apresentado na secção 2.3.4.1. Dependente do cenário de estudo, esperam-se determinados valores para o pico do ritmo de dados. Mais precisamente o sistema seria implementado e avaliado nos seguintes ambientes, onde espera-se os seguintes desempenhos:

- Ritmos até 100 Mbps em ambientes *indoor*, de baixa mobilidade, com utilizadores a moverem-se a uma velocidade de 3km/h;
- Ritmos até 20 Mbps em ambientes urbanos com utilizadores a moverem-se a uma velocidade de 60 km/h
- Ritmos até 10 Mbps a 300 km/h em ambientes rurais. Neste cenário assume-se que os utilizadores estarão inseridos num comboio de alta velocidade.

Nesta dissertação apresentam-se estudos baseados no uso da interface ar do sistema do MATRICE e inclui uso de suas características e técnicas inerentes [23].

2.5. Resumo

Neste capítulo apresentou-se a evolução das comunicações móveis ao longo dos últimos anos, bem como a tendência para a futura 4ª geração. Apresentaram-se os aspectos relacionados com as técnicas avançadas bem como aspectos mais a alto nível incluindo as recomendações da ITU-R no que se refere aos esforços no sentido de uma força comum para o sucesso das redes futuras, com a ITU-R a reforçar a ideia de um cenário de complementaridade entre técnicas existentes e as técnicas que vierem a suportar a componente de banda larga 4ª geração. Apresentou-se o MC-CDMA e as razões para o qual é considerada uma das sérias tecnologias candidata a sistema de acesso para a componente de banda larga das redes da 4ª geração. Apresentou-se igualmente o sistema do projecto MATRICE, onde o trabalho apresentado nesta dissertação se insere, que pretende ser uma proposta para a tecnologia de acesso para a componente de banda larga das redes da 4ª geração.

3. Simulação a nível de sistema

Este capítulo descreve o modelo de simulação a nível de sistema utilizado neste trabalho, com o objectivo de avaliar a capacidade do sistema, de acordo com os métodos de alocação dinâmica de canal. A complexidade da camada física do sistema é substituída por interfaces que reduzem a complexidade, normalmente na forma de tabelas. Neste capítulo apresenta-se o modelo de simulação implementado baseado na tecnologia de acesso MC-CDMA do MATRICE, incluindo as interfaces do simulador com a camada física. Apresenta-se de igual modo um modelo implementado para a interface com a rede IP. Esta interface IP permite ao simulador, adicionalmente à utilização dos modelos matemáticos para geração de tráfego, ser utilizado com tráfego IP real que inclua informações da qualidade de serviço, segundo as normas recentes propostas para o IPv6.

3.1. Arquitectura de simulador de sistema

Simuladores a nível de sistema para as tecnologias de acesso rádio, são concebidos para a avaliação da capacidade do sistema perante estratégias de gestão dos recursos rádio em determinados ambientes, no cenário multi-utilizador, multi-celular e multi-serviço, inserido na dinâmica inerente ao canal rádio móvel. Nomeadamente, estas estratégias têm a ver com a gestão das chamadas ou sessões através de algoritmos de suporte à mobilidade, admissão e rejeição de chamadas, *scheduling*, conjuntamente com a selecção da modulação e codificação a adequar às variações frequentes do canal rádio.

O sistema do MATRICE segue uma abordagem semelhante à da 3GPP para o UMTS, na estruturação da interface rádio em camadas como se apresenta na Figura 3-1 [24, 25]. Na figura apresentam-se as tarefas de controlo e protocolos de acesso, divididos em 3 camadas, a camada física (camada 1) camada de controlo de acesso à ligação (camada 2) e a camada de rede (camada 3).

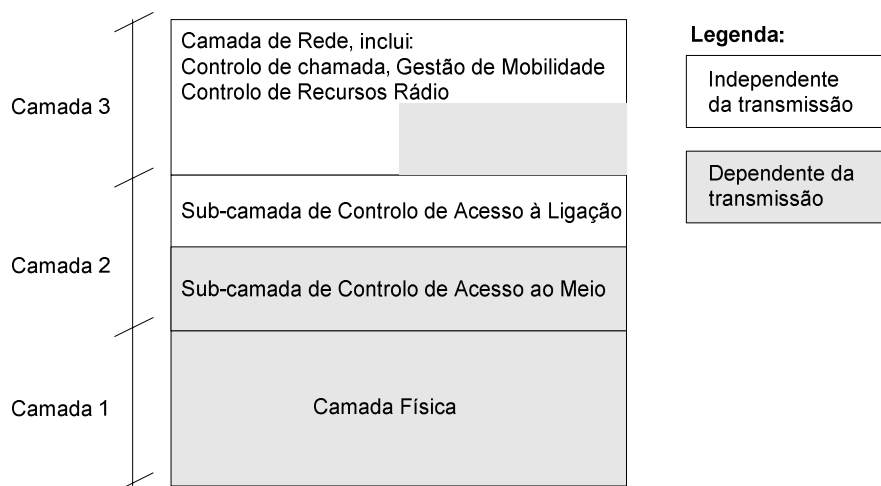


Figura 3-1: Interface rádio estruturada em camadas.

Os simuladores de sistema têm como objectivo o estudo de tarefas associadas às camadas 2 e 3, num sistema composto pelas três camadas da Figura 3-1. O simulador visa a avaliação das tarefas relacionadas com estas camadas, essencialmente estudo de algoritmos associados ao controlo de chamadas (admissão de novas chamadas e manutenção das chamadas já estabelecidas), gestão de mobilidade (algoritmos de *handover*) e gestão dos recursos rádio, controlo de acesso à ligação e o acesso ao meio na camada dois.

O simulador de sistema deve ser suficientemente completo de forma a fornecer um modelo preciso do sistema que se pretende estudar, e, ao mesmo tempo manter tempos de simulação e complexidades mínimas. O modelo conceptual do simulador é baseado na estrutura apresentada na Figura 3-2.

A camada de rede representada na Figura 3-1 é traduzida no simulador com a geração de pacotes IP com recurso a modelos matemáticos para tráfego de diferentes classe. No entanto a avaliação do sistema em determinadas condições reais de tráfego IP é possível e foi desenvolvida uma interface, a Interface IP, para possibilitar este estudo.

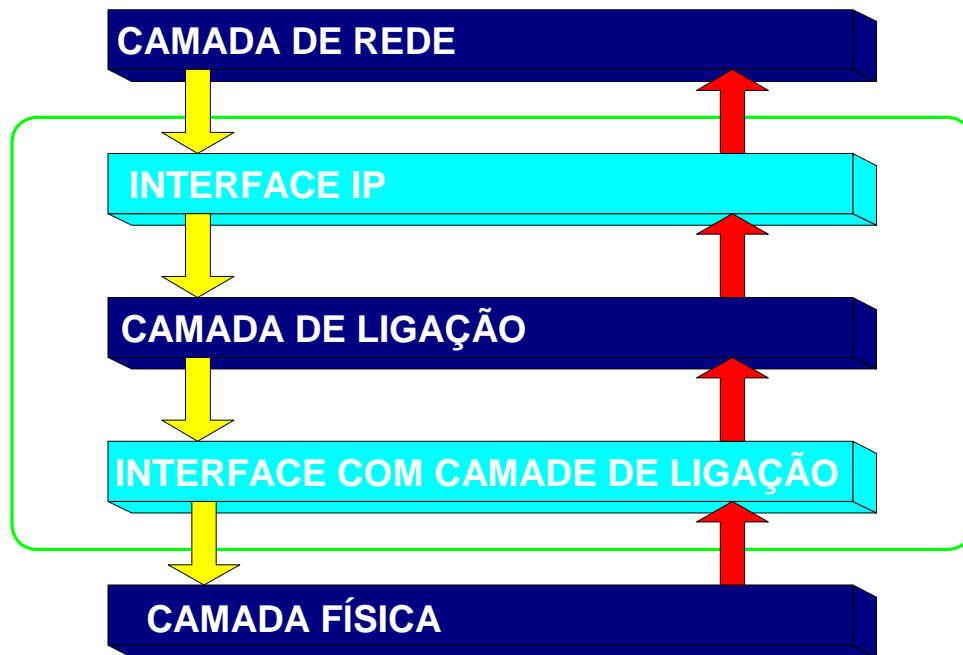


Figura 3-2: Modelo de simulador de sistema com as interfaces com as camadas IP e física.

A camada física, devido à complexidade acrescida, não é simulada directamente nos simuladores de sistema. Um compromisso entre a fiabilidade da ferramenta de simulação na representação da tecnologia de acesso avaliada e a complexidade (que se traduz em tempos de simulação dentro do razoável), conduz à utilização de uma interface de ligação entre o simulador de sistema e a camada física, feita através de tabelas de acesso directo. Estas tabelas são normalmente constituídas por um par de vectores (X, BLER) em que o vector X dá os parâmetros da qualidade de serviço, normalmente o SIR, e BLER é a probabilidade de erro do bloco equivalente ao parâmetro de qualidade. Esta interface deve no entanto permitir o mapeamento com elevado grau de precisão entre a camada do sistema e estatísticas de sinal da camada física para os variados formatos de transmissão (formas de modulação) disponibilizados pela tecnologia de acesso. O simulador de referência da camada física para o sistemas do MATRICE é apresentado na secção 3.2. . A descrição detalhada do simulador de sistema e sua composição em módulos é feita no Anexo I.

3.2. Camada física do sistema do MATRICE

A Figura 3-3 apresentada a cadeia de simulação *downlink* (DL) de referência do projecto MATRICE. Uma descrição detalhada das plataformas DL e *uplink* (UL), é apresentada em [26].

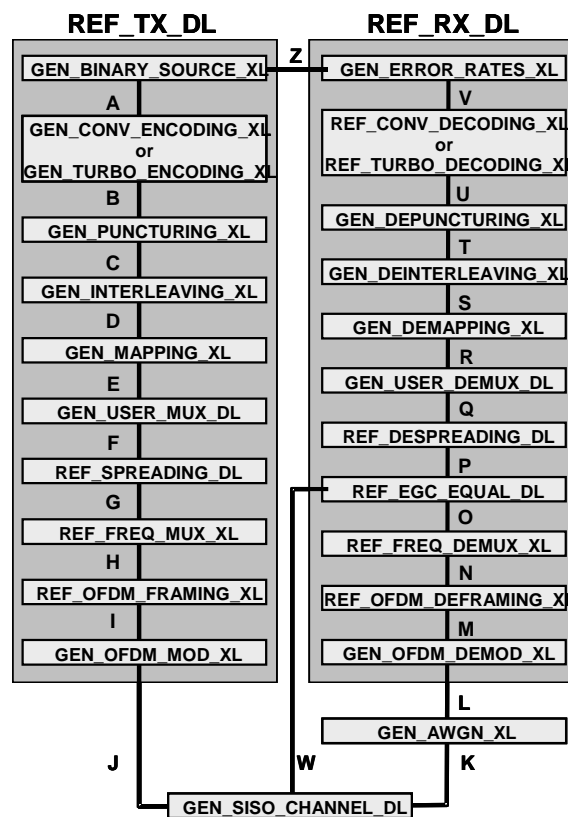


Figura 3-3: Cadeia de simulação de referência a nível físico.

O módulo de espalhamento (spreading) usa sequências de espalhamento de Walsh-Hadamard. O módulo de multiplexagem de frequência (Freq_Mux) distribui os *chips* de um símbolo de dados nas sub-portadoras disponíveis de forma a maximizar a diversidade na frequência no processo da desespalhamento. Os modelos de canal SISO DL e UL correspondem a um pacote de *software* que implementa o modelo da linha de atrasos de percurso de um canal e Rayleigh de desvanecimento rápido onde o efeito de Doppler é levado em conta. Na parte do receptor o módulo de equalização faz a equalização de fase ou a combinação de ganho comum (EGC) das amostras recebidas para cada sub-portadora. Os principais parâmetros de configuração da camada física estão apresentados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1. Parâmetros do sistema de referência do projecto MATRICE.

Largura de banda do canal	B_C	50 MHz
Raio da célula	R	< 1.5 km
Tempo de Guarda UL/DL	G	> 10 μ s
Largura de banda ocupada	B_O	41.46 MHz
Comprimento da FFT	N_{FFT}	1024
Frequência de amostragem	$f_s=1/T_s$	57.6 MHz = 15*3.84 MHz
Número de portadoras	N_C	736
Número de portadoras nulas	N_Z	144 (à esquerda), 1 portadora DC e 143 (à direita)
Duração do Slot	T_P	0.666 ms
Número de amostras por slot	N_P	38400
Símbolos OFDM por slot	N_S	30
Duração total de símbolo	T_T	21.5 μ s
Intervalo de Guarda	T_Δ	3.75 μ s
Intervalo de guarda em amostras	N_Δ	216
Tempo de guarda UL/DL	T_G	20.83 μ s
Tempo de guarda UL/DL em amostras	N_G	1200
Símbolo de pilotos completo	N_{PF}	6
Pilotos contínuos	N_{PC}	0
Pilotos dispersos	N_{PSc}	0
Número de portadoras para dados	N_D	736

Consideram-se dois tipos de trama, com 3 slots de tempo e duração 2ms e com 15 slots de tempo e duração 10ms, e o primeiro slot de cada trama é dedicado às transmissões DL. A Figura 3-4 apresenta um exemplo de trama com 15 slots de tempo. A estrutura do slot é comum a DL e UL. Em cada slot, os símbolos a laranja (S) são dedicados à sincronização, os a azul são dedicados à estimação do canal, os a fundo branco (D) são dedicados aos dados e finalmente os símbolos a verde (G) correspondem ao tempo de guarda.

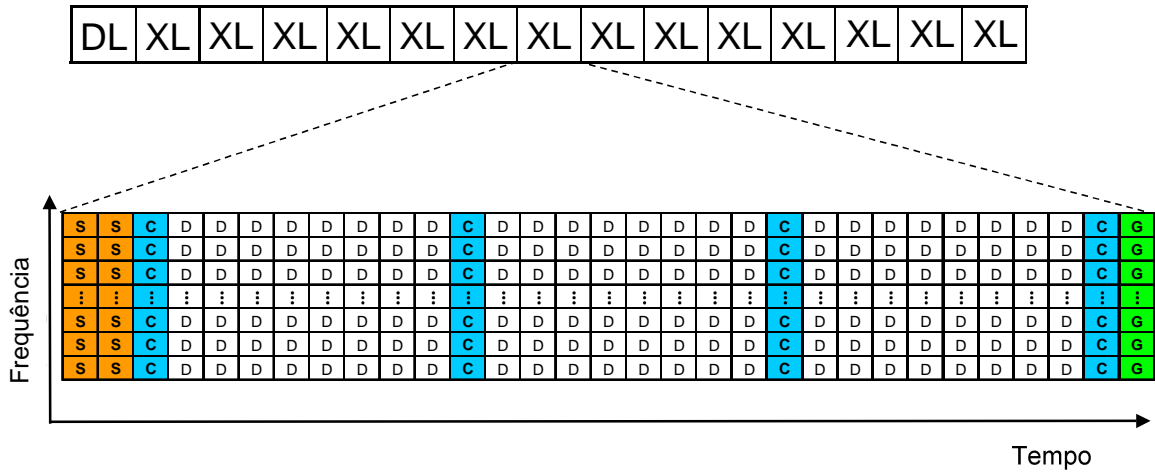


Figura 3-4: Estrutura de trama de 15 slots.

Com os valores apresentados Tabela 3-1 e dependente do alfabeto da modulação, isto é, do número de bits N_B por símbolo associado à técnica de modulação, e do ritmo da codificação, obtêm-se diferentes tamanhos para o bloco em termos de informação binária (B_{info}).

Considerando que o bloco de dados é mapeado sobre um único código de espalhamento e um único slot de tempo, assumindo que os símbolos de piloto não são espalhados, o tamanho de bloco é dado por:

$$B_{info} = \frac{(N_S - N_{PF})(N_C - N_{PC} - N_{PSc})N_B R_C}{SF} \quad (3.1)$$

Onde N_B é o número de bits por símbolo no alfabeto da modulação, R_C é o ritmo da codificação.

Usando os valores da Tabela 3-1 obtém-se:

$$B_{info} = \frac{(30 - 6) \times (736 - 0 - 0)}{32} N_B R = 552 \times N_B \times R \quad (3.2)$$

e o correspondente número total de bits (incluindo os símbolos do piloto) é

$$B_{total} = \frac{(30) \times (736)}{32} N_B R = 690 \times N_B \times R \quad (3.3)$$

O ritmo de bits de obtido com um código de espalhamento único num único slot de tempo é dado pela seguinte fórmula

$$D = \frac{552 \times N_B \times R}{N_{slots} \times T_p} \quad (3.4)$$

em que N_{slots} corresponde ao número de slots por trama e pode ser 3 ou 15.

Os esquemas de codificação e modulação (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) apresentados na tabela 3.2 foram os propostos para o projecto MATRICE.

Tabela 3-2. Mapeamento do MCS e ritmo de codificação no cenário de referência.

	N_B	R_c	B_{info} em bits	D em bits/s 1 código e 1 slot Trama 2ms	D em bits/s 1 código & 1 slot Trama de 10ms	Id. do MCS
QPSK	2	0,5	552	276000	55200	MCS1
	2	0,6666667	736	368000	73600	MCS2
	2	0,75	828	414000	82800	MCS3
16QAM	4	0,5	1104	552000	110400	MCS4
	4	0,6666667	1472	736000	147200	MCS5
	4	0,75	1656	828000	165600	MCS6
64QAM	6	0,5	1656	828000	165600	MCS7
	6	0,6666667	2208	1104000	220800	MCS8
	6	0,75	2484	1242000	248400	MCS9

B_{info} contém os seguintes bits de informação:

- Bits de dados;
- Informação de controlo da camada física dedicada ao móvel

3.3. Interface do simulador de sistema com a camada física

Normalmente simuladores a nível de sistema e a nível físico modelam e avaliam o desempenho da interface rádio em diferentes escalas de tempo. Simuladores a nível de sistema modelam o desempenho da ligação rádio através de tabelas de acesso directo, onde a qualidade de serviço da ligação rádio é avaliada em termos de BLER nos diferentes instantes da simulação, sendo normalmente tabelas de BLER em função da razão entre o sinal e interferência mais ruído (SINR).

A avaliação da qualidade da ligação rádio nas simulações a nível de sistema é feita periodicamente, a cada T_{qos} . O tempo T_{qos} corresponde ao período de controlo de potência lento, associado ao mecanismo de adaptação da ligação seleccionado para compensar as variações de desvanecimento lento e perdas de propagação. Pontualmente a avaliação da qualidade da ligação é feita por outros algoritmos RRM

como é o caso do controlo de admissão das chamadas (CAC). Numa determinada ligação rádio e num instante $n \times T_{qos}$ o simulador de sistema estima o parâmetro $BLER(n \times T_{qos})$, isto é, taxa de blocos de dados errados recebidos no período $[nT_{qos}; (n+1)T_{qos}]$.

O $BLER(n \times T_{qos})$ é estimado de acordo com os seguintes procedimentos:

- Simulador calcula no móvel a potência $P_i(n \times T_{qos})$ recebida de cada estação base (BS);
- O simulador calcula a razão entre o sinal e a interferência mais o ruído (equivalente ao parâmetro da qualidade de serviço);
- O simulador busca na tabela que contém o par de vectores $(X, BLER)$ e é deduzido o $BLER(n \times T_{qos})$

Nos cenários de tráfego com características de ligação por comutação de circuitos, o período de actividade da ligação é tipo tempo-real e o período de avaliação do sistema é longo, tendo em conta o tempo de coerência do desvanecimento rápido do canal rádio. Neste caso faz-se a avaliação da qualidade da ligação rádio num período considerado longo. Entretanto esta abordagem não é a mais apropriada para ligações do tipo comutação de pacotes. No caso de comutação de pacotes, requerem-se técnicas de avaliação da qualidade da ligação rádio em períodos relativamente curtos. Para os cenários alvo associados ao projecto MATRICE foram implementados duas interfaces com a camada física, conforme cenário de simulação. A Interface por Valor Médio foi implementada tendo em conta o cenário em que o período de actividade da ligação é longo tendo em conta o tempo de coerência do desvanecimento rápido do canal. A outra interface é por Valor Actual e é implementada tendo em conta o cenário em que o tempo de coerência do desvanecimento rápido do canal é da ordem de grandeza ou inferior ao período de avaliação do sistema. As secções 3.3.1 e 3.3.2 descrevem a forma como estas duas interfaces foram implementadas no simulador de sistema.

3.3.1 Interface de valor médio

A interface de valor médio é indicada como referido acima, para o caso de serviços tempo-real, onde normalmente o simulador de sistema avalia a qualidade da ligação rádio em períodos relativamente longos comparados com o tempo de coerência do canal. Estes serviços têm as seguintes características:

- Ritmo de bit de informação constante;
- Período de actividade da ligação tempo-real longo comparado com o tempo de coerência do desvanecimento rápido do canal;
- A taxa de erro do bloco (BLER) deve ser mantida constante e igual ao BLER alvo associado ao serviço.

A interface de valor médio pressupõe a estimação de BLER com elevada precisão pelo simulador de sistema nas seguintes condições:

- As perdas por propagação e o desvanecimento lento são quase constantes durante o período T_{qos} ;
- O tráfego é estacionário durante o período T_{qos} ;
- A atribuição de potência é constante durante o período T_{qos} ;
- A ligação encontra-se activa durante T_{qos} , o que significa que os recursos rádios atribuídos à ligação (grupo de códigos, sub-portadoras, potência, modulação e os slots de tempo) permanecem inalterados durante o corrente período de T_{qos} ;
- Verificação de redundância de código perfeita, ou seja, não há erro na determinação se o pacote foi recebido errado ou correctamente;
- O número de desvanecimentos rápidos que a ligação encontra durante o T_{qos} deve ser suficientemente grande para que possa aplicar a regra do número elevado.

Para a determinação das tabelas de acesso à camada física é considerado o sistema a operar com bloco único constituído por um slot de 10ms, um número N_i de códigos para cada MCS (definidos na secção 3.2.), como apresentado na Figura 3-5.

O ambiente é caracterizado pela velocidade do móvel e pelo modelo de propagação do canal multi-percurso. Nas simulações, esta interface é usado para velocidade de 60 km/h e com o modelo de canal que corresponde ao ambiente urbano.

Os seguintes parâmetros são usados na interface de valor médio:

- A potência do sinal recebida pelo móvel P_u ;
- A potência de interferência intra-celular I_{or} ;
- A potência de interferência inter-celular I_{oc} ;

- O BER (Taxa de Erro de Bits) que é o número de bits de informação recebidos erradamente durante todo tempo de simulação a nível de ligação;
- O BLER (Taxa de Erro de Blocos), que corresponde à razão entre blocos de informação recebidos erradamente e o número total de blocos recebidos durante todo o tempo de simulação a nível de ligação.

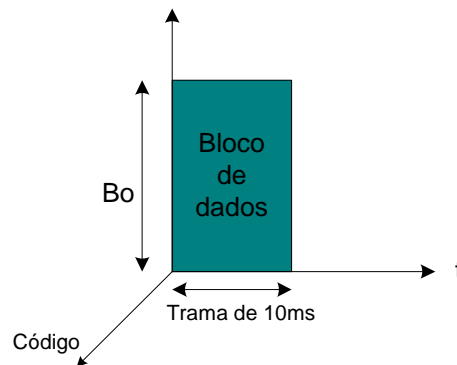


Figura 3-5: Atribuição código único e slot único.

Para a obtenção das tabelas, os projectistas do simulador de sistema fornecem aos responsáveis pelo simulador da camada física, os valores mínimos e máximos dos seguintes parâmetros:

- P_u/I_{or} : $P_u/I_{or\ min}$ e $P_u/I_{or\ max}$;
- I_{oc}/I_{or} : $I_{oc}/I_{or\ min}$ e $I_{oc}/I_{or\ max}$.

Os responsáveis pelo simulador da camada física devolvem:

- Um vector V_{in} com valores de BLER, tal que $V_{in}=[BLER_0, \dots, BLER_n]$
- Um vector V_{out} com valores de $X=P_u/I_o$, tal que $V_{out}=[X_0, \dots, X_n]$, correspondentes aos elementos de V_{in} .

Adicionalmente é fornecido pela camada física um vector com valores do factor de ortogonalidade em função do MCS e ambiente de simulação, isto é, $\alpha(MCS_m, ambiente)$.

Os requisitos para se ter uma gama de valores com elevada precisão, é que para cada índice n , $BLER_n - BLER_{n-1}$ deve sofrer variação constante e o intervalo deve ser pequeno. A Figura 3-6 apresenta na forma gráfica, um exemplo de tabelas BLER em função do P_u/I_o do sistema do MATRICE usando a interface de valor médio, para três dos MCSs apresentados na tabela 3.1. Os valores intermédios aos fornecidos pela tabela são

calculados por interpolação. Esta interface é genérica e curvas para outros MCSs poderão ser gerados a qualquer momento.

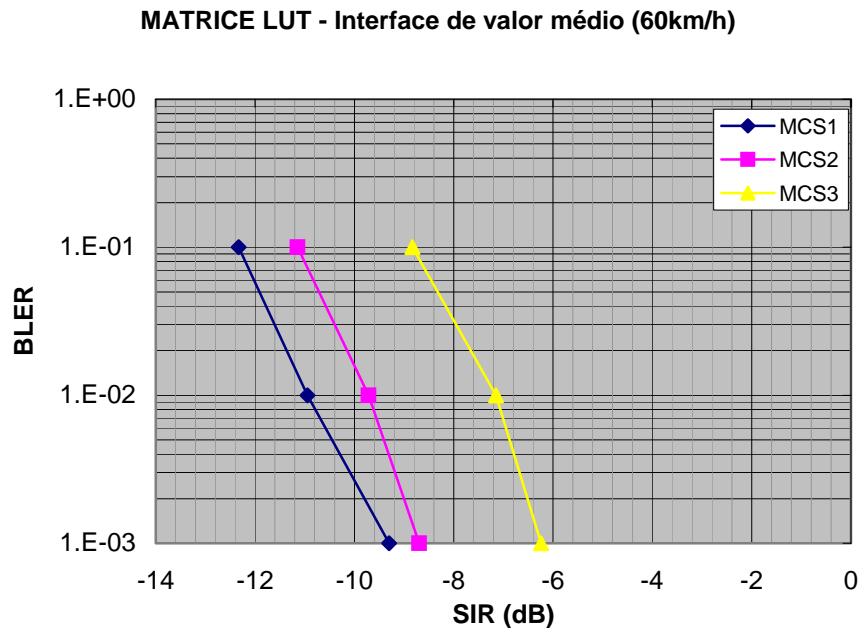


Figura 3-6: Curvas de BLER vs. SIR do sistema do MATRICE para a interface por valor médio.

A avaliação por parte do simulador se o pacote foi recebido correctamente ou não, é feita mediante comparação do valor de BLER da tabela com uma variável aleatória uniformemente distribuída entre zero e um. Os passos seguintes descrevem a forma como é determinado se o pacote foi recebido correctamente ou erradamente pelo móvel:

1. O simulador calcula o C/I (P_u/I_o);
2. Determina o $BLER(P_u/I_o)$ a partir da tabela;
3. Gera uma variável aleatória u entre 0 e 1;
4. Se $u \geq BLER$ o simulador determina que o pacote é recebido correctamente. Caso contrário é determinado que o pacote é recebido erradamente.

3.3.2 Interface de valor actual

A interface de valor actual é indicada para casos de ligações do tipo comutação de pacotes. Nestes casos o período associado à transmissão do pacote é curto, quando comparado com tempo de coerência do desvanecimento rápido do canal (cerca de $\frac{c}{f_o \times v}$, em que c é a velocidade da luz, f_o é a frequência da portadora e v é a velocidade

do móvel). Neste caso considera-se o tempo de transmissão do pacote igual ao de um slot de tempo e assume-se que, o desvanecimento rápido é constante durante esse período e os atrasos absorvidos pelo tempo de guarda.

Para o cálculo das componentes de desvanecimento rápido entre a estação base e o móvel é usado o modelo de Jakes [27] com período de amostragem igual ao período do slot. Por motivos de complexidade nos cálculos, para as estações interferentes é considerado uma única componente de desvanecimento rápido com potência média igual a um.

A interface de valor actual pressupõe a estimação de BLER com elevada precisão pelo simulador de sistema nas seguintes condições:

- As estações base encontram-se todas sincronizadas
- Não existe interferência entre slots de tempo consecutivos por causa do período de guarda;
- As perdas por propagação, o desvanecimento lento e o desvanecimento rápido são considerados constantes durante o período T_{slot} ;
- Os percursos associados ao desvanecimento rápido são mutuamente independentes;
- Cancelamento de interferência intracelular perfeita;
- Verificação de redundância de código perfeita, ou seja, não há erro na determinação se o pacote foi recebido errado ou correctamente.

O simulador de sistema calcula na parte do móvel a razão entre a potência de sinal e interferência mais o ruído no slot de tempo actual. A potência do sinal recebido em cada slot de tempo, $P_u(nT_{slot})$, é calculado em função da potência emitida, $P_t(nT_{slot})$, e as perdas CL :

$$P_u(nT_{slot}) = P_t(nT_{slot}) \times CL(nT_{slot}) \quad (3.5)$$

As perdas associadas à ligação relativamente à estação base de serviço são calculadas pela seguinte fórmula:

$$CL(nT_{slot}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{percurso}} (U_k(nT_{slot}))^2 \times G}{PL(nT_{slot}) \times SH(nT_{slot})}, \quad (3.6)$$

Em que:

- $SH(nT_{slot})$ é a componente de perdas associado ao desvanecimento lento entre o móvel e a estação base;
- $PL(nT_{slot})$ é a componente de perdas por propagação entre o móvel e a estação base;
- $U_k(nT_{slot})$ é a potência do k -ésimo percurso da componente do desvanecimento rápido entre o móvel e a estação base;
- G é o ganho da antena da estação base. A antena do móvel é isotrópica e tem por isso ganho 1.

A potência do sinal de interferência intercelular, I_{oc} , é calculado a partir potência de transmissão de cada estação interferente e as perdas associadas à referida estação interferente BS_i e o móvel, mais a potência recebida do ruído. Para diminuir a complexidade no cálculo do canal, para as estações interferentes considera-se *flat fading*.

$$I_{oc} = \sum_{i=1}^{N_{inter}} (P_{t_i}(nT_{slot}) \times CL_i) + P_{noise} \quad (3.7)$$

As perdas associadas à estação interferente BS_i e o móvel são calculados segundo a seguinte fórmula:

$$CL_i(nT_{slot}) = \frac{(W_i(nT_{slot}))^2 \times G_i}{PL_i(nT_{slot}) \times SH_i(nT_{slot})} \quad (3.8)$$

Em que:

- $SH_i(nT_{slot})$ é a componente de perda associado ao desvanecimento lento entre o móvel e a estação interferente;

- $PL_i(nT_{slot})$ é a componente de perdas por propagação entre o móvel e a estação interferente;
- $W_i(nT_{slot})$ é a potência do percurso único da componente do desvanecimento rápido entre o móvel e a estação interferente BS_i ;
- G_i é o ganho da antena da estação interferente.

A potência do ruído é essencialmente devido ao ruído térmico associado à cadeia de recepção.

A razão entre a potência de sinal, P_u , e interferência mais ruído I_{oc} é calculada da seguinte forma:

$$C / I = \frac{P_u}{I_{oc}} \quad (3.9)$$

Uma vez calculada a C / I , o simulador de sistema acede à tabela de dados que fornece o respectivo $BLER$ em função do $\frac{P_u}{I_{oc}}$, isto é, a probabilidade de erro do bloco em função

do $\frac{P_u}{I_{oc}}$ de termo curto. Essa tabela é fornecida pelas simulações da camada física.

A Figura 3-7 apresenta um exemplo de tabelas BLER em função do $\frac{P_u}{I_{oc}}$ do sistema do

MATRICE usando a interface de valor actual, para três dos MCSs apresentados na tabela 3.1. Os valores entre dois pontos da tabela serão obtidos por interpolação. Esta interface é genérica e curvas para outros MCSs poderão ser geradas a qualquer momento.

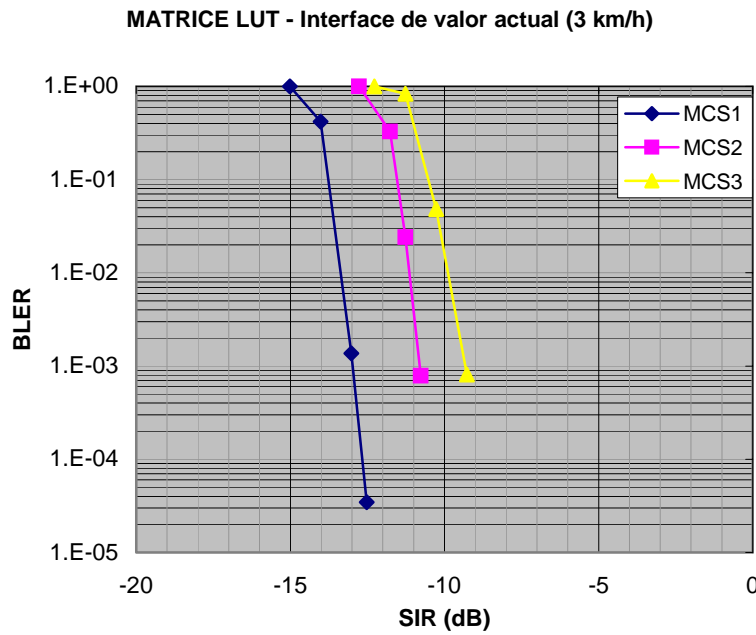


Figura 3-7: Curvas de BLER vs. SIR do sistema do MATRICE para a interface por valor actual.

3.3.3 Conversão BLER vs. E_b/N_o para BLER vs. P_u/I_o

A conversão das tabelas de BLER versus E_b/N_o fornecidas das simulações da camada física para curvas BLER versus P_u/I_o é necessário, uma vez que o simulador de sistema avalia a qualidade do canal através de cálculo de potências recebidas pela estação de referência e estações interferentes, e a potência de ruído nos andares da cadeia de recepção. A conversão é feita de acordo com a expressão (3.10).

$$\frac{P_u}{I_o} = SIR = \left(\frac{E_b}{I_o} \right) \frac{R_C N_B N_S N_C \left(\frac{1}{SF} \right) N_{slot}}{B_0 T_{frame}} \quad (3.10)$$

Em que P_u é a potência recebida da estação de referência, I_o é potência de interferência mais o ruído, E_b é a energia por bit. Para a modulação QPSK e usando o *Turbo coding* com ritmo 0.5, os restantes símbolos da expressão (3.10) têm os seguintes valores e significado:

- $R_C = 0.5$, é o ritmo de codificação do canal;
- $N_B = 2$, modulação QPSK (2 símbolos/constelação);
- $N_S = 30$, número de símbolos OFDM por slot;

- $N_C = 736$, número de portadoras;
- $SF = 32$, factor de espalhamento;
- $N_{slot} = 15$, número de slots;
- $B_0 = 41.46$ MHz, largura de banda efectiva do sistema;
- $T_{frame} = 10$ ms, período de trama;

3.4. Interface IP

3.4.1 Introdução

Na secção anterior apresentou-se a interface do simulador de sistema com a camada física. Nesta secção apresenta-se a interface do simulador de sistema com o tráfego Internet (IP) real. A interface é feita a nível da camada 3 (Figura 3-1), através de um módulo que integra o simulador. Esta interface, tem como objectivo proporcionar a avaliação do sistema mediante tráfego IP real [8]. Esta interface funciona do seguinte modo: o módulo opera sobre ficheiros de captura de tráfego Internet no formato *snoop* da Sun® [28], e transforma as informações dos pacotes capturados em tráfego com formato do simulador de sistema.

3.4.2 Descrição do módulo

3.4.2.1 Interfaces do módulo

A Figura 3-8 apresenta o diagrama de blocos conceptual que ilustra a operação do módulo. O módulo lê o ficheiro de captura, e conforme a configuração, escreve as informações do tráfego num ficheiro de texto ou carrega-o directamente no simulador. O módulo considera tráfego IPv6 [29] com características definidas da qualidade de serviço em cada pacote.

O módulo da interface IP fornece uma interface do simulador com tráfego IP real através de ficheiros de captura (capturados pelos *sniffers*) e tem duas características principais no que respeita às interfaces de saída:

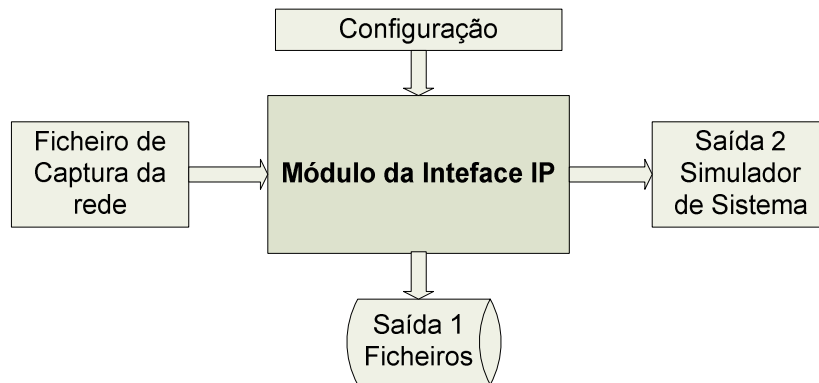


Figura 3-8: Diagrama de blocos conceptual do módulo da interface IP e de suas interfaces.

- Cria ficheiros de texto com os parâmetros do tráfego capturado, organizados por *streams*;
- Possibilita a leitura directa dos parâmetros de determinada sequência de pacotes no objecto de tráfego do simulador.

A primeira característica possibilita a interface do simulador através de ficheiros de parâmetros, enquanto que a segunda característica permite uma interface directa do ficheiro de captura com o simulador. O uso de ficheiros de texto com os parâmetros do tráfego, para além permitir um estudo de estatísticas do tráfego com programas tipo MATLAB®, possibilita também que sejam facilmente usados por outros simuladores.

3.4.2.2 Unidades internas

O módulo da Interface IP basicamente o que faz é aceder ao ficheiro de captura, colher informações de cada pacote e organiza-las por *stream*. De acordo com o IPv6, uma *stream* de pacotes corresponde a pacotes que vêm da fonte *source_id* para o destino *dest_id* e com o identificador de fluxo *flow_id* [29].

O módulo e suas unidades internas estão apresentados na Figura 3-9. O módulo é composto por três unidades principais: a Unidade de Leitura de Pacotes (no ficheiro de captura), Unidade de Extração de Parâmetros, Unidade de Escrita nos Ficheiros de Saída e Unidade de Carga no objecto de tráfego do simulador.

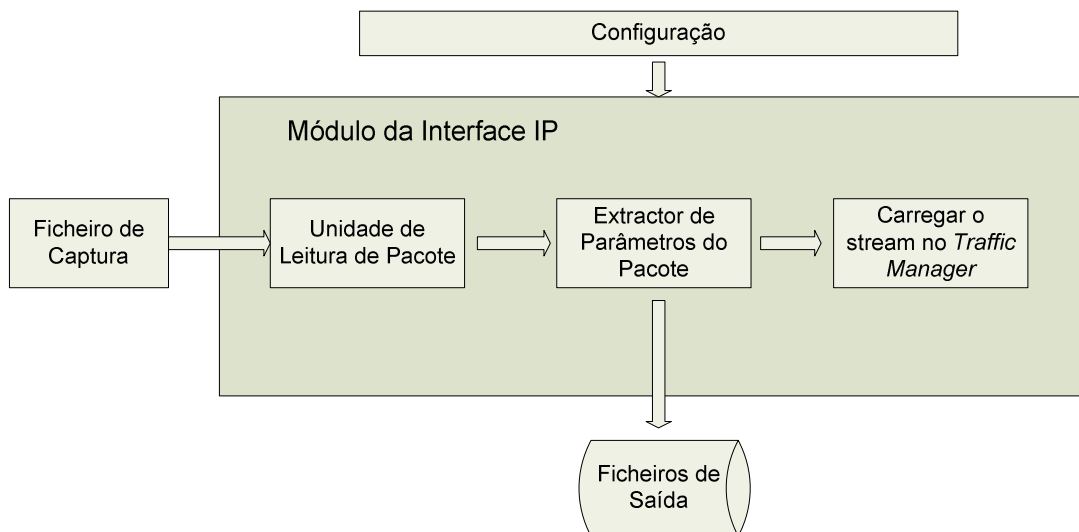


Figura 3-9: Composição interna do módulo da Interface IP.

A Unidade de Leitura de pacotes faz interface com o ficheiro de captura no formato *Snoop*, e efectua a leitura de cada pacote. A Unidade de Extração de Parâmetros acede aos campos dos pacotes capturados e extrai os conteúdos: do cabeçalho; do instante de captura; e do tamanho do pacote. Esta unidade gera e actualiza vectores de parâmetros associados a cada sequência de pacotes. A Unidade de Escrita nos Ficheiros cria ficheiros de parâmetros e escreve nos ficheiros os valores dos parâmetros. A Unidade de Carga no Objecto de Tráfego cria *stream* de tráfego e carrega-os no objecto de tráfego do simulador.

3.4.2.3 Características dos parâmetros

A interface IP considera alguns parâmetros de forma a ser possível a criação de uma réplica no simulador do tráfego capturado. Estes parâmetros são extraídos do ficheiro de captura e são armazenados em memória por *stream* de pacotes. Os parâmetros são:

- Endereço de origem do pacote: como parâmetro é um inteiro que vai de 0 a máximo número de endereços identificados no ficheiro de captura;
- Endereço de destino do pacote: também é um inteiro que vai de 0 a ao máximo número de endereços identificados no ficheiro de captura;

- Instante de chegada do pacote: é o instante de chegada do pacote, que corresponde ao instante de captura. Este valor é dado com a precisão do micro-segundo e é relativo ao início da captura;
- Tamanho de pacote: este valor, de acordo com o princípio de funcionamento do simulador, é dado em bits pela interface embora o ficheiro de captura registe-o em *Bytes*;
- Classe de serviço do pacote: é o identificador do tipo de serviço. No caso de DiffServ [30] corresponde ao código DSCP. Este parâmetro corresponde aos requisitos de serviço e está directamente relacionado com a probabilidade de erro e atraso esperados pelo pacote.

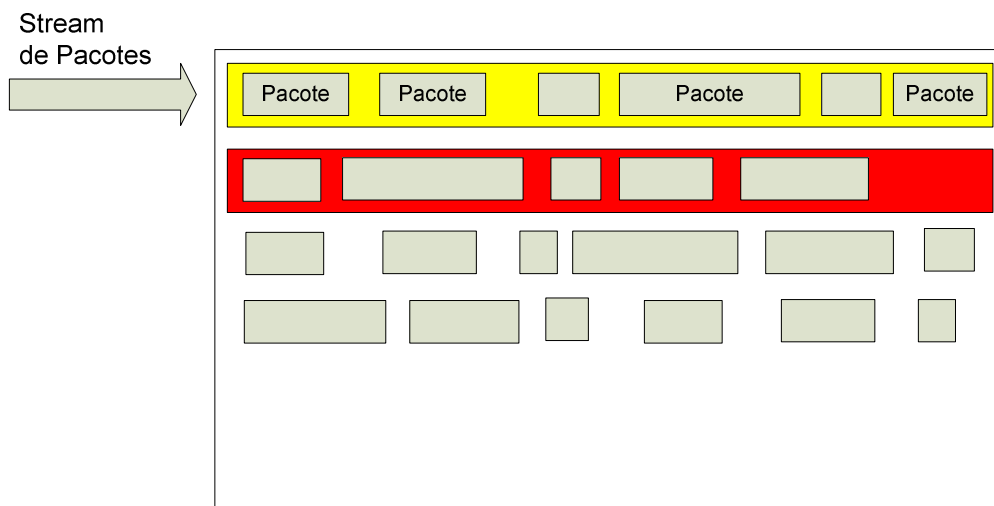


Figura 3-10: Ilustração do conceito do ficheiro de saída.

Como referido no início desta subsecção, o módulo organiza os parâmetros descritos acima por *stream* de pacotes, sendo que cada *stream* é identificado pela combinação dos endereços fonte e destino e o identificador de fluxo. Na verdade a sequência poderia ser identificada simplesmente pelo endereço de origem e o identificador de fluxo [29], mas para evitar ambiguidades resultantes de pacotes onde a origem não marca o identificador de fluxo no cabeçalho, o endereço de destino foi incluído nesta abordagem.

No módulo existe um vector para cada parâmetro, sendo que o vector está organizado por *stream*, numa estrutura semelhante ao apresentado na Figura 3-10. A figura esquematiza o vector com valor de somente um tipo de parâmetro, onde cada linha corresponde a valores de parâmetros de um determinado *stream*. Uma vez parâmetros

organizados desta forma em memória, as primitivas do módulo poderão, quer transportá-los para ficheiros de saída ou carregá-los no objecto de tráfego do simulador criando réplicas do tráfego capturado.

3.4.3 Ficheiros de saída

Os parâmetros descritos anteriormente são armazenados numa série de ficheiros de texto onde cada ficheiro contém valores de um parâmetro específico. O nome do ficheiro deve identificar o parâmetro. A organização dos valores dos parâmetros nos ficheiros de texto, um por cada parâmetro, segue a organização dos parâmetros em memória e é ilustrada na Tabela 3-3. Em cada linha, os parâmetros são separados pelo carácter de tabulação <TAB>.

Um exemplo de captura e respectivos ficheiros texto criados são apresentados no Anexo 3.

Tabela 3-3: Ficheiro de texto de um parâmetro genérico.

Identificador de Sequência	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4
0
1
2
3
4
5

3.5. Resumo

Neste capítulo descreveu-se as características do simulador de sistema usado para desenvolver o trabalho apresentado nesta dissertação. Descreveu-se de forma genérica a abordagem associada aos simuladores de sistema, suas interfaces e especificamente o caso do simulador desenvolvido no âmbito do projecto MATRICE para este trabalho. Apresentou-se as opções relativamente às interfaces com a camada física, isto é, interfaces por valor médio e por valor actual baseadas nas condições em que o simulador de sistema avalia o canal rádio, a termo longo e a termo curto respectivamente. Relativamente ao tráfego IP, apresentou-se uma interface que permite ao simulador avaliar o desempenho dos algoritmos com base em tráfego IP real.

4. Algoritmos de scheduling

Este capítulo descreve o algoritmo de *scheduling* de pacotes proposto para sistemas MC-CDMA/TDD, onde a priorização de pacotes é feita com a combinação de medidas do estado da ligação rádio com os requisitos de serviço associado ao tráfego dos utilizadores e analisa seu desempenho num cenário típico. Na secção 4.2. descreve-se o algoritmo de referência, que tende a maximizar o *throughput* da célula. Na secção 4.3. apresenta-se o algoritmo do projecto. Nas secções 4.4. e 4.5. são apresentados os cenários de simulação e os resultados obtidos pelo sistema com este algoritmo respectivamente.

4.1. Introdução

O tráfego Internet foi desde sua génese e ao longo dos tempos um tráfego *best effort*, o que significa que a selecção e encaminhamento nos pontos de decisão, em cada nó da rede, estão optimizados para a entrega do maior número possível de pacotes ao destinatário, no período de tempo mais curto, sem no entanto garantir a entrega. Dada à natureza do tráfego inicialmente previsto na Internet, isto é, troca de ficheiros, email, acesso remoto etc, a garantia de qualidade de serviço entre os nós finais ou um esforço nesse sentido não terá sido encarado como uma necessidade vital, e embora o cabeçalho IP tem desde as versões iniciais um campo destinado à prioridade do pacote.

Desde a última década tem-se assistido esforços no sentido de melhorar a qualidade no serviço de tráfego Internet, do ponto de vistas das aplicações. O resultado destes esforços na comunidade IETF [31] é o aparecimento de arquitecturas e mecanismos que

dão suporte à qualidade de serviço na Internet, inclusive o desenvolvimento da nova versão do protocolo IP, o IPv6 [29], concebido a pensar também nestes requisitos. Relativamente à alocação de recursos para suportar qualidade de serviço, duas grandes arquitecturas foram propostas – Os serviços Integrados que se baseiam na reserva de recursos com garantia total de qualidade de serviço, e os Serviços Diferenciados que se baseia na diferenciação do tipo de tráfego em cada nó [30]. A primeira, embora proporcione a garantia de serviço ao utilizador final, é menos flexível em termos de optimização de recursos, enquanto que os Serviços Diferenciados, embora não garanta a satisfação plena ao utilizador final, tem como vantagem a flexibilidade permitindo um melhor acesso e gestão de recursos [32, 33]. A tendência é para um vínculo por parte da arquitectura dos Serviços Diferenciados, que pela sua flexibilidade permite a optimização de recursos através de algoritmos de gestão e partilha da largura de banda entre as diferentes classes de tráfego ou clientes.

Os sistemas rádio móvel inicialmente desenvolvidos para tráfego de voz, por seu lado tendem cada vez mais a ter parcelas significativas de tráfego de pacotes, o que proporcionou a evolução do GSM com a implementação do GPRS (2.5G), e o desenvolvimento e entrada recente no mercado das redes UMTS (3G). Acompanhando esta tendência, as directivas para o projecto das redes de 4ª geração tanto a parte da rede *core* como a parte de acesso rádio, é inteiramente direccionado ao tráfego de pacotes, devendo intrinsecamente incluir mecanismos de suporte de qualidade de serviço.

A tecnologia MC-CDMA por seu lado, que aparece como uma das técnicas de acesso mais promissora para o suporte à componente de banda larga das redes de 4ª geração, oferece elevada flexibilidade do ponto de vista da gestão de recursos rádio. O MC-CDMA permite a gestão de recursos no tempo (slots de tempo), na frequência (portadoras) e no código de espalhamento, e quando usado com antenas múltiplas, permite também a gestão a nível espacial. Um dos desafios associados a estes sistemas no cenário de relativa flexibilidade, é a gestão óptima dos recursos de forma a tirar o melhor partido da capacidade do sistema e ao mesmo tempo satisfazer os requisitos dos utilizadores, no ambiente adverso do canal rádio móvel de banda larga.

Havendo em fila tráfego de vários utilizadores e de classes diferentes, a decisão da política a seguir na selecção do pacote que deve ser transmitido bem como os recursos rádio a serem utilizados e de que maneira, isto é, modulação, potência etc., é feita pelo *scheduler*.

4.2. Algoritmo de referência

4.2.1 Paradigma rede cablada e rede sem fio

Nas redes cabladas são usadas políticas de *scheduling* muito populares para servir tráfego de classes de serviço diferentes. Estas políticas dividem-se a grosso modo em três categorias: as do tipo *fair queuing*, as baseados em *deadline* dos pacotes e as Baseadas no Ritmo de Dados da Sessão. Na política *fair queuing* o *weighted fair queuing* é a mais popular [30, 34], sendo que nesta política a largura de banda é partilhada pelas classes de tráfego e a largura de banda de cada classe é representada por um número real que corresponde à “fatia” da banda que é dedicada à classe. Na política baseada em *deadline* os pacotes são prioritizados de acordo com o tempo limite de espera, sendo os pacotes com *deadline* mais curto servidos em primeiro lugar. Na política baseada no Ritmo de Dados da Sessão, existe para além do *scheduler*, um módulo regulador que efectua uma pré-selecção dos pacotes que não excederem a largura de banda que é dedicada à sessão correspondente.

As políticas de *scheduling* nas redes cabladas são ditadas essencialmente pelos limites de atraso e largura de banda impostas pela aplicação, informações que chegam ao *scheduler* vindas de camadas superiores. A Figura 4-1 ilustra uma ligação por cabo (ou fibra) entre dois nós ponto-a-ponto (*Routers*). Os *Routers* para estes nós efectuem a priorização de pacotes no *scheduler* com base em variáveis de estado (atraso) e em informações dos requisitos de serviço, provenientes de camadas superiores [35, 36, 37].

As políticas de *scheduling* comuns nas redes cabladas no entanto têm um fraco desempenho quando usadas directamente nas redes sem fio. Nas redes por cabo, pode-se assumir que o canal físico é invariante quando comparado com os tempos de sessão. Este cenário torna-se no entanto completamente diferente nas redes móveis, onde a topologia é dinâmica, isto é, os utilizadores “entram” e “saem” (em cada sessão), movem-se durante as sessões, o que origina uma dinâmica na qualidade da ligação e onde pacotes com destinos diferentes são normalmente associados a ligações com diferentes níveis de sinal e de interferência (SIR). A Figura 4-2 ilustra a topologia das redes móveis celulares.

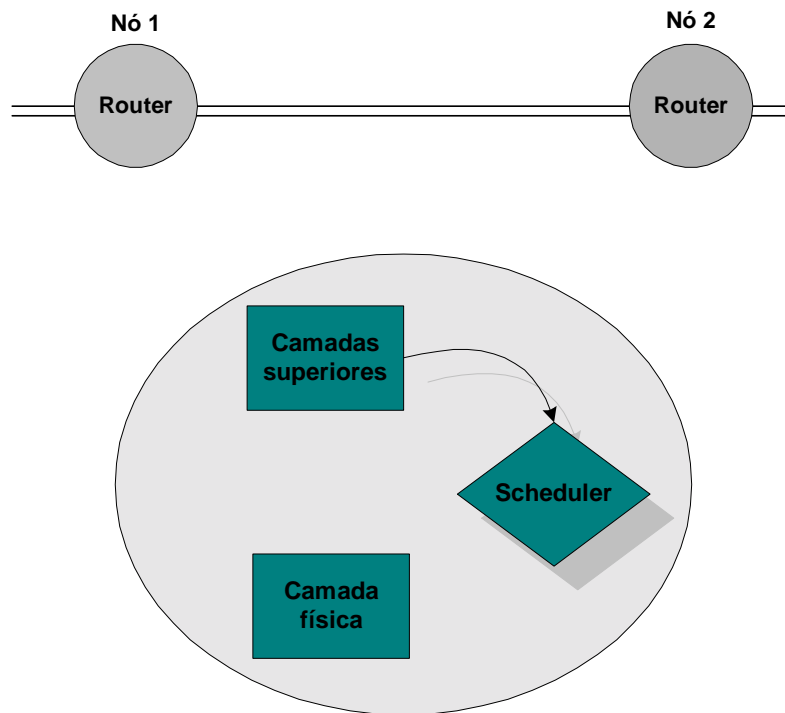


Figura 4-1: Ligação entre dois nós em redes cabladas. *Scheduling* com base em informações de camadas superiores.

4.2.2 *Scheduling* de referência – Maximização do *throughput* da célula

A forma de otimizar a capacidade nos sistemas rádio móvel é tirar partido das características da topologia do sistema celular, com um *scheduling* que serve pacotes de utilizadores com as melhores condições de sinal, isto é, pelas medidas do SIR do canal. Esta abordagem é proposta no HSDPA para a optimização da largura de banda do sistema [6, 7] . Contrariamente às redes por cabo, nesta abordagem de optimização da capacidade, o *scheduler* usa somente a informação da camada física na selecção do pacote que será servido. A Figura 4-3 ilustra a abordagem feita neste *scheduler*. O algoritmo de *scheduling* que optimiza a capacidade do sistema pode ser representado pela seguinte expressão:

$$Priority = arg(Max(SIR_{User_i})) \quad (4-1)$$

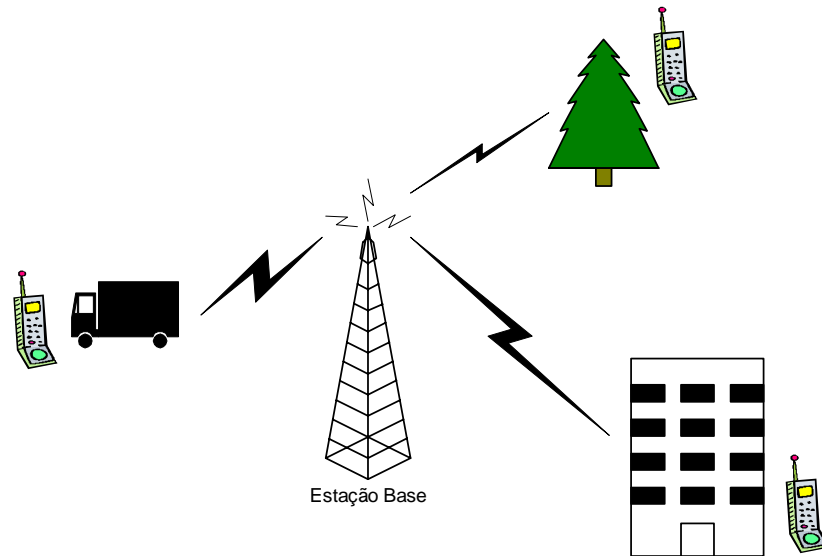


Figura 4-2: Topologia das redes celulares.

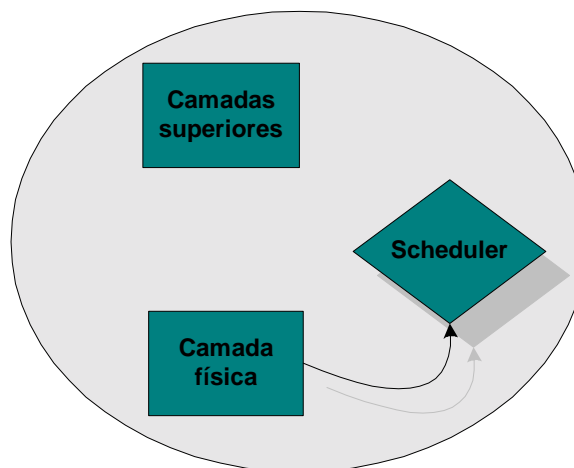


Figura 4-3: *Scheduling* para optimização da largura de banda nas redes sem fio.

No entanto, algoritmos de *scheduling* eficientes são necessários para gerir o acesso aos recursos por parte dos utilizadores activos no sistema rádio móvel, quando se pretende oferecer qualidade serviço nas redes rádio. Os algoritmos de *scheduling* deverão ter em conta não só as condições de canal no instante de decisão (informação de camada inferior), mas também requisitos da qualidade de serviço do tráfego (informações de camadas superiores). Um algoritmo baseado nestes dois níveis de informação, irá

corresponder a um compromisso entre a satisfação dos requisitos do tráfego e do *throughput* do sistema.

4.3. Algoritmo de projecto

Na secção 4.2. apresentaram-se as políticas de *scheduling* numa abordagem de redes por cabo e redes sem fio. Se no caso das redes cabladas as políticas de *scheduling* em cada sessão podem ser implementadas com base única e exclusivamente nas informações relativamente aos requisitos do serviço, fornecidos pelas camadas superiores, da topologia dinâmica das redes rádio móvel ressaltou que esta política teria de certo modo um mau desempenho se aplicado directamente nestas redes. A abordagem sugerida para a optimização do *throughput* nas redes rádio seria ter em conta as condições de ligação de cada utilizador e fazer o *scheduling* com base no SIR de cada utilizador.

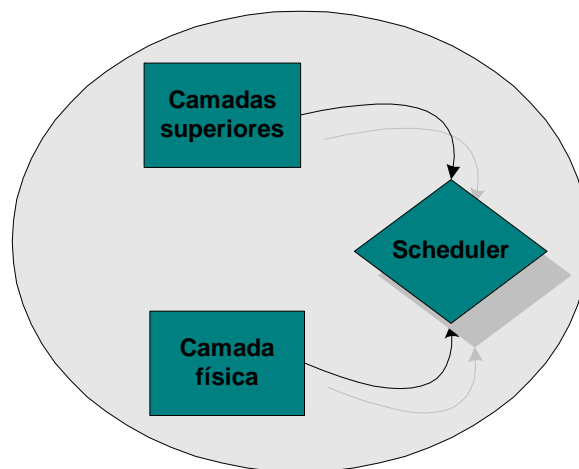


Figura 4-4: Prioritização de tráfego com base em informação de camadas superiores e camada física.

No entanto se o atraso for um requisito importante no serviço, e no caso de haver múltiplas classes de serviço com custos diferentes, esta abordagem para o *scheduling* será ineficiente uma vez que os utilizadores com o canal nas melhores condições tenderiam a monopolizar o sistema e utilizadores com canal em piores condições teriam pacotes com atrasos excessivos e consequentemente descartados. Neste caso a

conclusão óbvia é que um algoritmo de *scheduling* que leva em conta somente o estado e variabilidade de canal dos utilizadores e a natureza dinâmica da rede será pouco eficiente e terá também certamente um desempenho ineficiente na maioria das situações.

4.3.1 Função de prioridade do *scheduling*

Nesta secção propõe-se um algoritmo de *scheduling* que combina as condições instantâneas do canal rádio e aspectos relacionado com a qualidade de serviço, nomeadamente o atraso que os pacotes sofrem em cada instante de decisão, isto é, combinando as informações da camada física e dos requisitos de serviço das camadas superiores. O algoritmo é descrito a seguir.

O algoritmo de *scheduling* foi proposto com base em tráfego multi-serviço e baseia-se em dar pesos a parâmetros que afectam a funcionalidade da aplicação e o desempenho do sistema. Para cada pacote na fila é lhe calculado analiticamente um valor de prioridade no instante de *scheduling*. O valor da prioridade é obtido através de uma combinação de pesos de robustez na transmissão, do tempo de espera do pacote na fila e do número de tentativas de transmissões já efectuadas pelo processo de ARQ (Automatic ReQuest). Convém referir que a inclusão do peso relativamente ao número de tentativas de transmissão do pacote faz sentido uma vez o método de *Chase combining* é usado no receptor para melhorar a qualidade do sinal recebido em cada retransmissão [6, 38], e por conseguinte, melhorar a robustez na transmissão.

A função que corresponde ao peso da robustez que se espera na transmissão, W_1 , é obtida através de um indicador da qualidade do canal (CQI), fornecido pelo móvel à estação base. A função que corresponde ao peso do atraso do pacote na fila, W_2 , é obtida através do valor do tempo de espera (Time-out) do pacote na fila. O tempo de espera é definido através do atraso de transferência máximo permitido para a classe de serviço [39]. A função do peso de tentativas de transmissão, W_3 , é a função que usa o número de transmissões do pacote pelo processo ARQ. A função de prioridade combina as funções peso W_1 , W_2 e W_3 indicadas acima de forma a obter um valor de prioridade, em que pacotes com valores de prioridade mais elevados serão seleccionados para transmissão. A função de prioridade que se propõe combina os pesos de acordo com a seguinte expressão:

$$Priority = W_1(type, SIR) (W_2(type, time_out) + W_3(type, \#attempTx)) \quad (4-2)$$

As funções W_1 , W_2 e W_3 são descritas nas subsecções 4.3.1.1, 4.3.1.2 e 4.3.1.3 respectivamente.

4.3.1.1 Função de robustez na transmissão, W_1

O peso esperado para a robustez na transmissão é obtido com o valor do CQI reportado pelo móvel, que reflecte o SIR a que o móvel está sujeito no instante de decisão pelo scheduler. A função da robustez na transmissão é uma função ternária em que três valores estão associados com: transmissão com baixa probabilidade de recepção do pacote correctamente, transmissão com probabilidade razoável do pacote ser recebido correctamente e transmissão com elevada probabilidade do pacote ser recebido correctamente respectivamente. A distinção entre estes três casos é feita de acordo com os valores de SIR relativamente e os requisitos da taxa de erro alvo do serviço. A expressão (4.3) e a Figura 4-5 representam analiticamente e graficamente a função peso de robustez na transmissão,

$$W_1(\text{Serviço}, \text{SIR}) = \begin{cases} \sim 0 & \text{se } \text{SIR} < \text{Alvo} \\ 1 & \text{se } \text{Alvo} \leq \text{SIR} < \text{Alvo} + \text{Limiar} \\ 2 & \text{se } \text{SIR} \geq \text{Alvo} + \text{Limiar} \end{cases} \quad (4-3)$$

em que *Alvo* e o *Limiar* são valores definidos para o tipo de serviço.

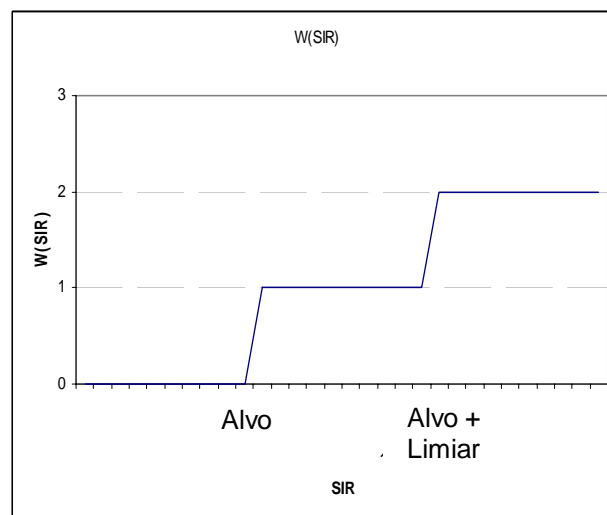


Figura 4-5: Função da robustez na transmissão.

4.3.1.2 Função de Tempo de espera do pacote, W_2

A função de tempo de espera do pacote é uma função linear descrita analiticamente e graficamente pela expressão (4-4) e pela Figura 4-6.

$$W_2(\text{Serviço}, \text{TempoDeEspera}) = k(\text{MaxAtraso} - \text{TempoDeEspera}) \quad (4-4)$$

em que Tempo de espera corresponde ao *deadline*, ou seja, tempo que ainda resta ao pacote na fila antes de ser descartado, e o *MaxAtraso* é uma função do serviço.

Na expressão, a constante k corresponde ao declive da recta e vem ditado pelo tempo de espera máximo permitido pelo pacote. Na função proposta para o peso do tempo de espera, a ordenada na origem corresponde ao máximo da função de robustez na transmissão.

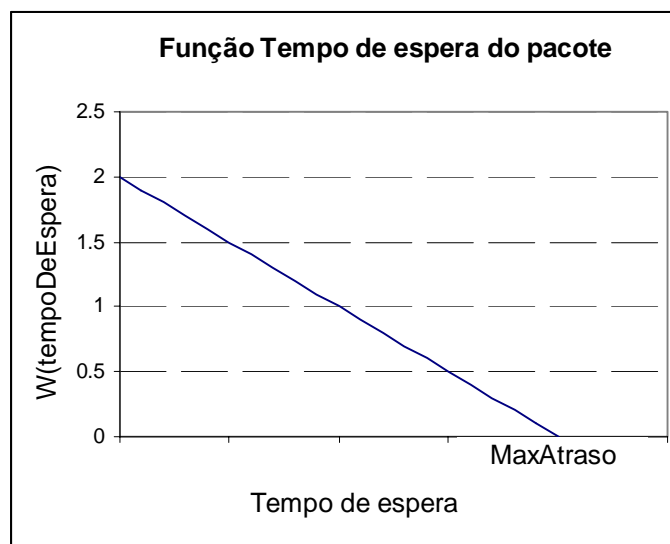


Figura 4-6: Função de atraso.

4.3.1.3 Função de tentativas de transmissão, W_3

A função de número de tentativas de transmissão é uma função que depende do número máximo de transmissões e aumenta linearmente com o número tentativas já efectuadas. A função é descrita analiticamente e graficamente pela expressão (4-5) e pela Figura 4-7

respectivamente para o caso de 3, embora outros valores poderão ser explorados. Após a terceira transmissão sem sucesso o pacote é eliminado.

$$W_3(\text{Type}, \text{AttempTx}) = \begin{cases} 0 & \text{if Attemp Tx} = 0 \\ 1 & \text{if Attemp Tx} = 1 \\ 2 & \text{if Attemp Tx} = 2 \end{cases} \quad (4-5)$$

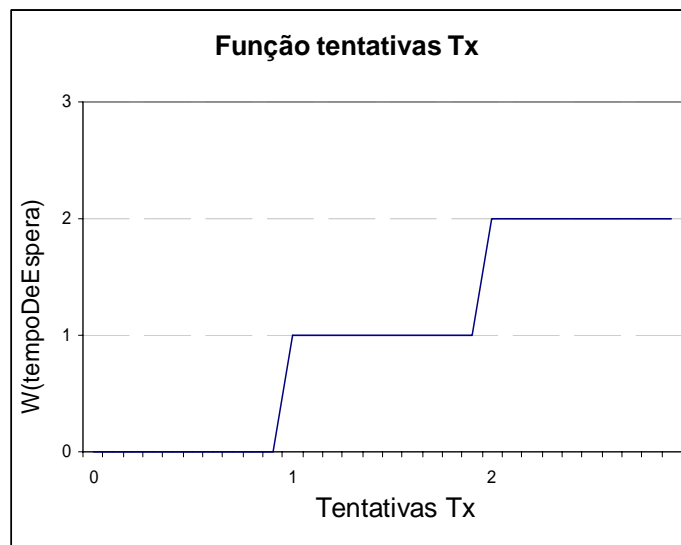


Figura 4-7: Função de tentativas de transmissão.

4.4. Estrutura do DRA e Cenário de simulação

O cenário utilizado nas simulações inclui um grupo de entidades específicas que permite de uma forma genérica a implementação de uma estrutura de alocação dinâmica de recursos (DRA) na camada MAC para rede móvel destinado para o tráfego de pacotes, onde se inclui o scheduler. O grupo de entidades inclui também funcionalidades adicionais nomeadamente a compatibilidade com a interface com o IP e mecanismos para garantir optimização do *throughput* na interface ar do sistema MC-CDMA. Esta estrutura do DRA baseia-se numa estrutura muito semelhante ao HSDPA proposto para o UMTS [6]. Mais especificamente, o DRA inclui os seguintes blocos funcionais: Fila de pacotes, *Scheduler*, Indicador da Qualidade de Sinal (IQS) do utilizador caracterizado pelo SINR, Adaptação da ligação, H-ARQ com o *Chase combining* e o Mapa de recursos

rádio. Estes blocos e seu processo de funcionamento são descritos com detalhe no anexo A1 e na secção 4.4.1 são apresentadas as características e parametrização específicas destes blocos. Concretamente, com esta estrutura de DRA pretende-se avaliar algoritmos de *scheduling* de pacotes, que exploram informações da camada física bem como da camada 3 por forma obter-se um *scheduler* equilibrado em termos de satisfação de utilizadores e o *throughput* da célula. Em particular, os algoritmos de *scheduling* deverão suportar os requisitos de serviço em cenários de tráfego de serviços mistos atribuindo um valor que corresponde à prioridade do pacote de acordo com a função de prioridade descrita na secção 4.3. . A Figura 4-8 apresenta o diagrama da arquitectura do DRA.

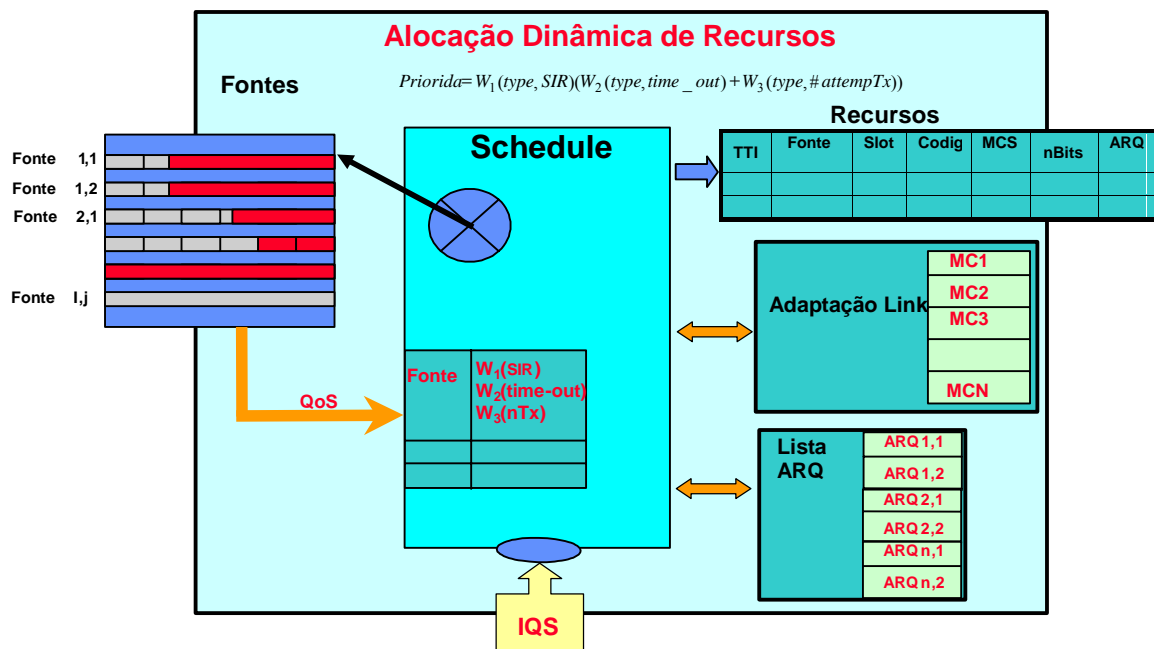


Figura 4-8: Estrutura e funcionalidades do DRA.

O sistema suporta qualidade de serviço para I tipos de fontes de informação. Os parâmetros QoS que caracterizam o serviço associado a um determinado móvel são o taxa de erro de pacote (PER) e o atraso máximo na transferência do pacote [39]. Os pacotes IP são associados aos utilizadores U_i e serviço S_j . Uma vez chegado à estação base da rede proveniente da rede Core, o pacote é caracterizado de acordo com o estado. O *scheduler* recebe informação do canal acerca do SIR dos vários móveis e analisa o estado associado aos pacotes de todas as fontes e serve o pacote da fonte *Fonteld*, para transmitir *nBits*, correspondente ao tamanho do pacote, usando o esquema de codificação e modulação conjunta *MCSId* (secção 3.2.1), usando o código de

empalhamento *CodeId* do slot *SlotId*, através do processo de ARQ *ARQId*. Uma vez transmitido, o pacote será recebido correctamente ou erradamente resultando neste último caso na retransmissão do pacote usando os mesmos *MCSId* e *ARQId*. A caracterização do estado de cada pacote é actualizada em cada TTI e o estado é usado para calcular o valor de prioridade do pacote. O processo de transmissão e retransmissão é controlado pelo processo ARQ.

4.4.1 Características do sistema

Vários são os aspectos ligados à gestão dos recursos rádio, em especial nas redes de pacotes, como é o caso do UMTS. Embora o trabalho apresentado nesta dissertação foca os algoritmos de *scheduling*, outros aspectos de gestão de recursos como é o caso de controlo de potência, controlo de admissão de utilizadores, controlo da carga de tráfego e algoritmo de *handover* são aspectos que condicionam o desempenho do sistema, ou seja têm influência directa sobre a capacidade o mesmo [40]. Para a avaliação da capacidade deste sistema foi implementado uma estrutura de alocação de recursos baseado no HSDPA do UMTS. As opções levadas a cabo podem ser divididas em três categorias: estrutura do DRA e seus blocos internos; classes de serviços e modelos de tráfego utilizados; e estrutura de trama utilizada. Esta secção descreve os detalhes e procedimentos da gestão dos recursos rádio associado ao sistema, onde se inclui o *scheduler*.

4.4.1.1 Codificação e Modulação Adaptativa (MCS) e tamanho do pacote

O modelo de DRA implementado suporta tráfego com qualidade de serviço em cenário de serviços múltiplos. No entanto de modo a evitar a integração de um adaptador para converter pacotes de tamanhos variados em blocos rádio de tamanho fixo de acordo com o MCS, assumimos que todos os pacotes têm tamanho fixo igual um bloco rádio associado ao MCS1, isto é, de 552 bits. Com esta opção, o tráfego manterá suas características sendo que no entanto o tráfego gerado é seccionado em pacotes de 552 bits.

4.4.1.2 Potência alocada à célula

Tratando-se de *downlink* e um sistema com as características do HSDPA, não é usado controlo de potência. A estação base transmite sempre à potência máxima em cada trama e a parcela da potência total da célula atribuída aos dados é partilhada de forma equitativa pelos 30 códigos. A potência é *alocada* da seguinte forma: 70% da potência total da célula é atribuída a transmissão de dados e os restantes 30% é atribuída à transmissão do piloto (CPICH).

4.4.1.3 Classes de serviços e densidade de tráfego

O DRA implementado é testado com classes de tráfego com características tempo-real e não tempo real. O sistema funciona em cenário de tráfego misto e as seguintes classes tráfego foram consideradas:

- Modelo aproximado de fonte de tráfego de voz; este é um modelo de tráfego *On-Off* em que os tempos t_{on} e t_{off} são distribuídos exponencialmente com médias 1 seg. e 1.35 seg. respectivamente [41]. Durante o período *On* a fonte de tráfego gera tráfego de bitrate constante (CBR) de 11.04 kbps, que corresponde a valor mais próximo de 12.2 kbps para o serviço de voz no UMTS. Este valor é obtido através da geração no período *On* de um pacote de 552 bits em cada 5 tramas, isto é, a cada 50 ms. Este serviço tem características de tempo real e o atraso máximo permitido é 30 ms.
- Outro modelo de tráfego usado é fonte de tráfego aproximado de Web. O modelo proposto baseia-se em chamadas de pacotes num conceito muito semelhante ao modelo *On-Off* com médias t_{on} e t_{off} . O tempo t_{on} corresponde ao período de chamada e o tempo t_{off} corresponde ao tempo entre chamadas. O modelo específico de caracterização de pacotes no período t_{on} , corresponde a uma combinação de distribuição exponencial e de Pareto, em que a distribuição exponencial é usada na determinação do número de pacotes e o intervalo entre pacotes consecutivos em cada chamada obedecem à distribuição exponencial e o tamanho de cada pacote obedece à distribuição de Pareto. O tempo t_{on} vai depender no final da largura de banda de pico considerada na rede core. Para estas simulações consideramos largura de banda de pico de 2 Mbps. O tempo t_{off} correspondente ao tempo entre

chamadas é exponencialmente distribuído e a média considerada entre chamadas é de 5 segundos [7].

Os modelos de tráfego são descritos em pormenor no Anexo 2.

Como referido acima, as simulações foram efectuadas em ambiente multi-serviço com utilizadores de Web e de voz em simultâneo no sistema. A carga de tráfego considerada nas simulações em termos de número de utilizadores de cada serviço, foi de 20 utilizadores ligados ao sistema com serviços de voz e 9 utilizadores com serviços de Web. Os utilizadores estão ligados ao sistema durante todo período da simulação.

4.4.1.4 Estimação do canal e informação da qualidade da ligação

A adaptação dos parâmetros da ligação ao canal rádio é sensível a alguns factores nomeadamente a forma como é feita estimação e é obtida a informação do estado do canal rádio, isto é, do valor do SINR. Em termos de conceito, a codificação e modulação adaptativa (AMC) é uma categoria de adaptação da ligação às condições do canal. O AMC é sensível aos erros na estimação da qualidade do canal e a atrasos no fornecimento desta informação por parte do móvel à estação base. O *Scheduler*, para além da escolha do utilizador / pacote a atribuir recurso para transmissão, selecciona a modulação adequada com base na qualidade do canal. Por conseguinte os erros na estimação do canal poderão fazer com que seja seleccionada modulação inadequada e em alguns casos, transmissão com potência mais elevada do que seria necessária desperdiçando assim recurso e capacidade do sistema ou, no caso de potência abaixo do que seria recomendado, provocar aumento da taxa de erros de pacotes. Por outro lado, atraso na informação do estado do canal reduz a fiabilidade na estimação devido à variabilidade do canal rádio. Isto é mais acentuado quando maior for o desvio de Doppler no canal, isto é, quanto maior for a velocidade do móvel.

Considerando estimação e informação da qualidade do canal rádio no sistema proposto, assumiu-se que a estação base selecciona o formato de transporte, isto é o AMC, de acordo com a Indicação da Qualidade do Canal fornecido pelo móvel. Assume-se que a estimação do canal é perfeita, efectuada em cada TTI e que a informação da qualidade do canal é recebida pela estação base duas tramas depois de estimado pelo móvel. Para suavizar as alterações do canal na estimação do canal em cada TTI, é usado um filtro IIR em que novo valor tem um peso de 70% e o valor da estimação anterior tem um peso de 30%. A estimação do canal no TTI nT_f em que T_f é o período de trama, é representada

pela expressão (4-6), em que o peso da nova medida do canal é igual a 0.7 e o peso da estimação do canal no TTI anterior $n-1$, é igual a 0.3.

$$\hat{SINR}(nT_f) = 0.7 \times SINR_{medido}(nT_f) + 0.3 \times \hat{SINR}((n-1)T_f) \quad (4-6)$$

De acordo com as condições assumidas no sistema, o erro no canal só está relacionado com o grau de variabilidade do canal entre o TTI em que o canal foi estimado e o TTI em que pacote é transmitido após seleccionado pelo *scheduler*. O tempo entre o instante da estimação do canal pelo móvel, e a utilização dessa informação pelo *scheduler* tem a duração de 5 tramas.

4.4.1.5 H-ARQ com *Chase combining*

O *Hybrid Automatic ReQuest* (H-ARQ), permite a adaptação da ligação reduzindo os níveis de MCS necessários para transmitir o mesmo pacote e diminuindo a sensibilidade do sistema no que se refere a erros de medida e flutuações do canal. Nesta subsecção apresenta-se o mecanismo associado ao H-ARQ neste sistema e que se baseia no *Chase combining*.

O canal *Stop-And-Wait*

Para descrever o protocolo associado ao H-ARQ, consideramos uma estação móvel MS_i com uma ligação à estação base BS_j e com um pacote por receber. A estação BS_j envia o pacote ao MS_i , através de um canal H-ARQ que guarda uma réplica do pacote enviado bem como a identificação do MCS utilizado na transmissão. Depois da transmitir para o móvel MS_i através do canal H-ARQ ' n ', BS_j pára a transmissão e aguarda uma mensagem do móvel (*Stop-and-Wait*) a indicar o modo de recepção do pacote. O móvel envia um ACK se pacote for recebido correctamente ou um NACK se o pacote for recebido erradamente. A BS_j retransmite o pacote se receber um NACK ou liberta o canal H-ARQ se receber ACK, podendo o canal H-ARQ transmitir então outro pacote. O canal H-ARQ também é libertado uma vez atingido o máximo de tentativas estipulada.

Para evitar desperdício de largura de banda, são usados processos ARQ paralelos de forma a garantir transmissão contínua para um determinado móvel. A Figura 4-9 apresenta um caso em que são usados 4 canais ARQ.

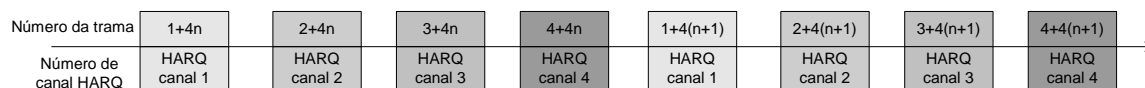


Figura 4-9: Transmissão contínua com 4 canais H-ARQ paralelos.

O processo de transmissão, recepção, confirmação (ACK/NACK) usando um canal ARQ tem a duração de 4 tramas, como descrito a seguir:

1. Na trama ' n ' a estação BS_j faz o *scheduling* do pacote ' x ' alocando o canal H-ARQ ' c ';
2. Na trama ' $n+1$ ' a BS_j difunde informação num canal *broadcast* da atribuição feita (Id do móvel, MCS etc.) para que o móvel se prepare para receber o pacote;
3. Na trama ' $n+2$ ' a BS_j transmite o pacote de acordo com a atribuição feita;
4. Na trama ' $n+3$ ' o MS_i envia à BS_j o modo de recepção do pacote.

Um exemplo de transmissão através do canal 3, no caso de 4 canais paralelos é apresentado na Figura 4-10. Diagramas do mesmo tipo do apresentado na Figura 4-10 poderão ser derivados para o canal H-ARQ 1 estipulando-se que a BS_j envia o pacote nos períodos de trama identificado pelo H-ARQ "1", H-ARQ 2 estipulando-se que a BS_j envia o pacote em tramas do identificado como sendo do H-ARQ "2" e que H-ARQ 4 estipulando-se que a BS_j envia o pacote em período de trama identificado pelo H-ARQ "4" respectivamente.

Chase Combining e ganho associado

A análise é feita no processo com um máximo de três transmissões por bloco de dados. Este mecanismo poderá no entanto, ser facilmente estendido para diferentes números máximos de transmissões.

Na descrição deste protocolo consideramos um móvel MS_i com uma ligação estabelecida à estação base BS_j . A estação BS_j envia um pacote para o móvel MS_i , usando por exemplo o canal H-ARQ número ' n '. Um bloco de dados é mapeado directamente numa unidade de recurso rádio (RU), que corresponde a um determinado código de espalhamento identificado num slot de tempo.

Descreve-se de seguida o mecanismo de ARQ com *Chase combining*, na parte do receptor. A descrição é feita a alto nível, isto é, a nível de sistema. A descrição em

detalhe a nível de camada inferior do *Chase combining* (e outros métodos de combinação) associado ao H-ARQ em canais com desvanecimento, poderá ser encontrada em [38].

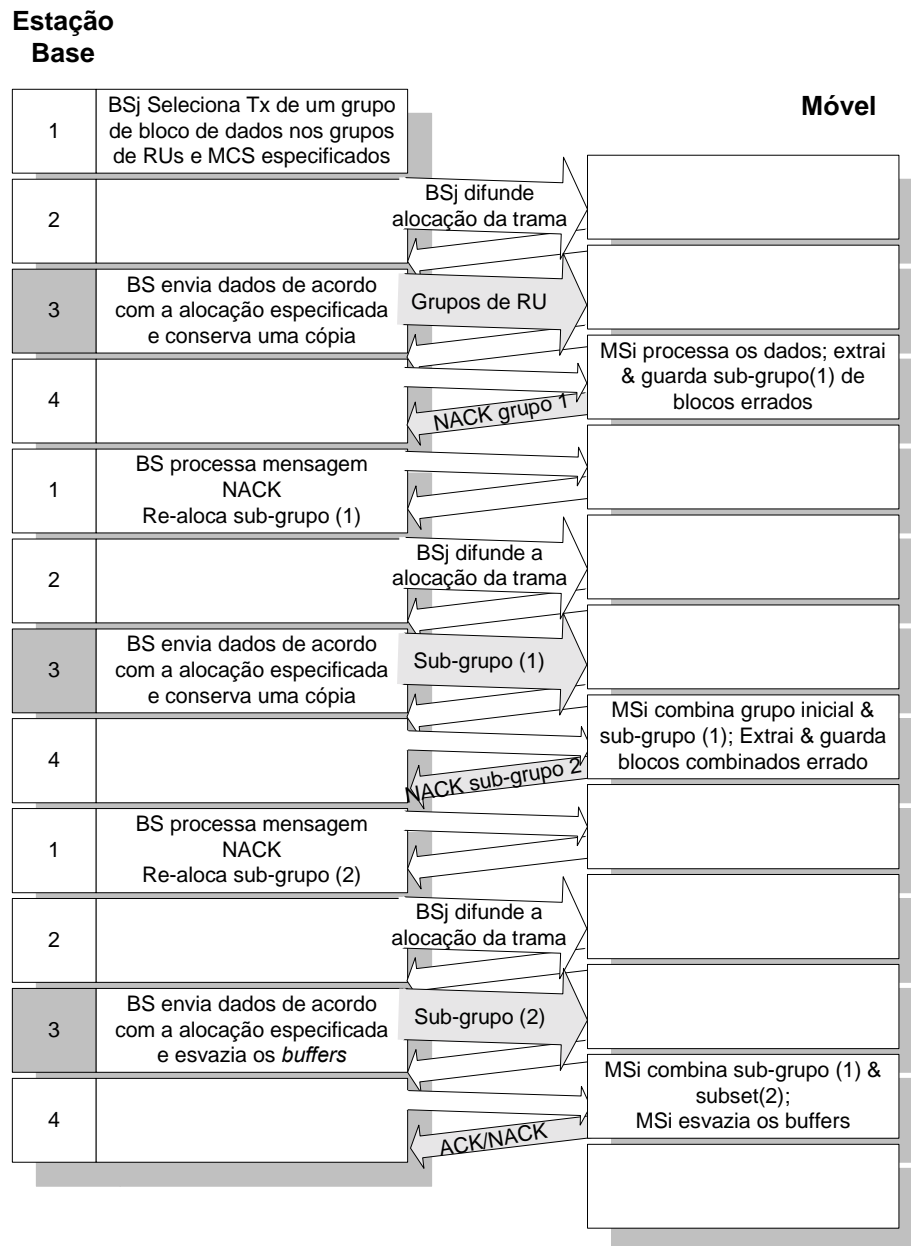


Figura 4-10: Exemplo de transmissão do canal 3 do processo H-ARQ.

O protocolo é descrito como se segue:

1. Primeira transmissão

- BS_j faz o *scheduling* do pacote que será transmitido, no canal H-ARQ ' n ' associado ao MS_i de destino, e selecciona os recursos rádio que serão usados na transmissão do pacote, inclusive o MCS;

- BS_j difunde a sinalização que informa ao MS_i de que a primeira transmissão foi seleccionada para a próxima trama, identificando o RU e o MCS dedicado ao MS_i ;
- BS_j transmite o pacote na trama dedicada ao canal H-ARQ ' n ', conservando uma cópia no *buffer* dedicado ao canal H-ARQ ' n ';
- O MS_i recebe o pacote, executa o processamento identificando erro (identificado através de verificação redundância cíclica - CRC). Não havendo blocos errados o MS_i envia uma mensagem de ACK. Havendo um bloco errado o MS_i envia uma mensagem de NACK, indicando a coordenada do RU que foi recebido erradamente. O MS_i conserva uma cópia do sinal recebido (pacote) num buffer aguardando pela retransmissão. A versão conservada no buffer corresponde à primeira 'versão' do bloco recebido;

2. Segunda transmissão

- Esta fase ocorre depois recebido a mensagem de NACK pela BS_j . BS_j identifica o bloco que foi recebido erradamente e que deverá ser retransmitido;
- BS_j limpa os buffers com cópia dos canais H-ARQ associados aos RU que foram recebidos correctamente e mantém cópia dos que foram recebidos erradamente e que serão retransmitidos. Quando seleccionado pelo *scheduler* a BS_j aloca o mesmo RU e MCS que foram usados para a primeira transmissão para retransmissão do pacote;
- BS_j retransmite os dados;
- MS_j recebe os dados retransmitidos e combina através do *Chase combining*, o sinal recebido com a versão recebida da primeira transmissão. O resultado da combinação de sinais é processado e o MS_i extrai dados errados da combinação, mais uma vez através da verificação do CRC. Não havendo dados errados, MS_i envia uma mensagem de ACK à BS_j . Se houver dado que foi recebido erradamente o MS_i envia uma mensagem de NACK à BS_j . O MS_i conserva no buffer uma cópia da combinação de sinais da primeira e da segunda transmissão;

3. Terceira transmissão

- Mais uma vez, esta fase ocorre depois recebido a mensagem de NACK pela BS_j . BS_j identifica o bloco que foi recebido erradamente e que deverá ser outra vez

retransmitido, limpando os buffers com cópia dos canais H-ARQ associados aos RU que foram recebidos correctamente;

- Quando seleccionado para retransmissão pelo *scheduler*, a BS_j aloca o mesmo RU e MCS que foram usados para a primeira e segunda transmissões para a nova retransmissão do pacote;
- BS_j retransmite os dados e liberta o buffer, por ser a última retransmissão;
- MS_i recebe os dados retransmitidos e combina o sinal recebido com a combinação da primeira e segunda versão, conservado no buffer. O resultado de mais esta combinação (da primeira, segunda e terceira transmissões) é processado e o MS_i extrai dados errados da combinação. Não havendo dados errados, MS_i envia uma mensagem de ACK à BS_j . Sendo a última transmissão, se houverem dados errados o MS_i envia uma mensagem de NACK à BS_j e limpa o buffer.

O nível de sinal (SIR) obtido com a técnica do *Chase combining* em cada tentativa de transmissão pode ser representado analiticamente pela expressão (4-7), em que N corresponde ao número de tentativas efectuadas e SIR_t é a SIR no MS_i aquando da tentativa t .

$$SIR = \sum_{t=1}^N SIR_t \quad (4-7)$$

4.4.1.6 Estrutura da trama

Foram definidos dois tipos de trama para o sistema do MATRICE: trama do tipo 1 de curta duração, com duração de 2 ms e mapeado em 3 slots; e trama do tipo 2, trama longa de 10 ms e mapeado em 15 slots, como apresentado na secção 3.2.1. A estrutura de trama corresponde ao do HSDPA do UMTS-TDD, onde é considerado somente o *downlink*. A estrutura de trama bem como o número de slots usados nas simulações é semelhante ao do UMTS-TDD, com 15 slots de tempo em cada 10 ms. Um número ' x ' de slots ($x < 15$) é atribuído para a alocação de recursos em *downlink*. Embora uma das flexibilidades associadas ao TDD seja o ajuste de largura de banda para *downlink* e *uplink*, de acordo com a carga de tráfego em cada direcção, assumiu-se que o número de slots alocados para *downlink* é fixo durante toda a simulação. Para limitar a duração das

simulações balanceando a carga de tráfego (no caso concreto o número de utilizadores no sistema) com o número de recursos disponíveis, foi alocado um único slot na trama de 10ms e com 30 códigos para dados para serem partilhados pelos utilizadores em downlink. Com esta opção, e assumindo que o sistema só transmite usando o esquema de codificação e modulação conjunta MCS1, o sistema terá uma capacidade teórica de:

$$\frac{30 * 552 \text{ bits}}{10E - 3 \text{ seg.}} \approx 1.66 \text{ Mbps}$$

4.4.1.7 Cenário e método de simulação

Os resultados obtidos de cada cenário correspondem a média de um número razoável de amostras de simulações. A duração de cada amostra (simulação) é correspondente a 300 segundos do tempo real. Os móveis entram no sistema no início da simulação e permanecem ligados ao sistema durante todo o tempo da simulação. O instante inicial de geração de tráfego em cada móvel é aleatório de forma a garantir um estado estacionário do sistema no arranque da simulação. Os parâmetros relativamente ao cenário de simulação encontram-se resumidos na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Parâmetros de simulação.

Ambiente de simulação	Urbano
Raio da célula	300 m
Tipo de célula (Omni ou sectorizada)	Omni
Velocidade do móvel	3km/h
Modelo de canal – Perdas por propagação e desvanecimento lento	Modelo de canal urbano
Modelo de canal - desvanecimento rápido	ETSI BRAN E
Interface com camada física MATRICE	Interface de Valor Actual
Serviços	Voz e Web simultaneamente
Número de utilizadores de voz	20
Número de utilizadores de Web	9
Duração da trama	10 ms
Número de slots de tempo alocado para DL	1
Número de códigos de espalhamento alocados para dados	30

4.4.2 Métricas de desempenho

Foram seleccionadas métricas para a avaliação do desempenho do sistema relativamente ao utilizador individual e em relação ao sistema global. Relativamente ao utilizador individual a métrica é a percentagem de Utilizadores Satisfeitos e em termos de sistema é o *throughput* médio da célula. Estas métricas são definidas a seguir.

4.4.2.1 Utilizador satisfeito

O desempenho dos algoritmos em termos de utilizador satisfeito é medido pelo atraso de transferência do pacote e no ritmo de erro de pacotes residual. Na secção 4.4.1.1 assume-se pacotes com o mesmo tamanho de um bloco de forma a fazer-se o mapeamento directo do pacote no bloco de dados. Isto significa que a análise feita em termos de pacote é equivalente à análise feita em termos de bloco, uma vez que um bloco é equivalente a um pacote. No tratamento dos resultados optamos por apresentar os resultados em termos de bloco de dados.

Atraso de transferência

Relativamente ao atraso um utilizador é considerado satisfeito se valor de 95% da função distribuição dos atrasos dos blocos na sessão for inferior ao valor limiar estipulado pelo serviço.

Serviço de Voz

- Atraso máximo na transferência de bloco para o serviço de Voz é de 30 ms.

Serviço de Web

- Atraso máximo na transferência de bloco para o serviço de Web é de 300 ms.

Ritmo de erro de blocos residual

O ritmo de erro residual de blocos está associado ao erro observado após o número máximo de tentativas de transmissão do bloco tiver sido atingida. Considera-se também o erro resultante do pacote descartado da fila após ter atingido o tempo máximo de espera na fila. O tempo máximo de espera na fila está associado a serviços do tipo tempo-real. O ritmo de erro residual de blocos (BLER) é definido como a razão entre a soma do número

de pacotes errados após ter atingido o número máximo de tentativas de transmissão com número de blocos descartados e o número total de blocos transmitidos.

Serviço de Voz

- O valor limiar para o BLER para o serviço de Voz, de acordo com sistema do MATRICE para o MCS1 de $1e-1$.

Serviço de Web

- O valor limiar para o BLER para o serviço de Web, de acordo com sistema do MATRICE para o MCS1 de $1e-2$.

Em resumo considera-se que um utilizador de serviço de voz satisfeito se 95% dos pacotes tiverem atraso não superior a 30 ms e o ritmo de erro de pacotes for inferior a $1e-1$. Um utilizador de serviço de Web considera-se satisfeito se 95% dos pacotes forem recebidos com um atraso não superior a 300 ms e o ritmo de erro de pacotes for inferior a $1e-2$.

4.4.2.2 Desempenho a nível de sistema

As medidas de desempenho a nível do sistema foi baseada em [6] e é dada em termos de:

- Throughput sobre a interface ar (OTA)

Esta métrica corresponde ao número de bits transmitido pela célula durante todo tempo da simulação dividido pela duração da simulação. O valor obtido é a média de todas as células. Esta métrica é dada pela seguinte expressão:

$$OTA = \frac{\sum_{j=1}^N OTA_{cell_j}}{N} \quad (4-8)$$

Em que N é o número de células consideradas na simulação e:

$$OTA_{cell_j} = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} P_{bits}(i)}{T_o} \quad (4-9)$$

Sendo:

$P_{bits}(i)$ = Tamanho do i -ésimo pacote transmitido;

T_o = Duração da simulação;

$i \text{ max}$ = Número de pacotes transmitidos.

- Throughput de serviço

Corresponde ao número de bits correctamente recebidos pela célula durante todo o tempo de simulação a dividir pelo tempo total da simulação. Esta métrica deve ser a média ponderada de todas as células e é dada pela seguinte expressão:

$$Th_serv = \frac{\sum_{j=1}^N Th_serv_{cell_j}}{N} \quad (4-10)$$

Em que N é o número de células consideradas na simulação e:

$$Th_serv_{cell_j} = \frac{\sum_{k=1}^{k \text{ max}} P_{bits}(k)}{T_o} \quad (4-11)$$

Sendo:

$P_{bits}(k)$ = Tamanho do k -ésimo pacote recebido correctamente;

T_o = Duração da simulação;

$k \text{ max}$ = Número de pacotes recebidos correctamente.

- Razão entre Throughput de serviço e OTA

Como o nome diz, obtém pela relação entre o *Throughput* de serviço e *Throughput* sobre interface ar. Esta métrica permite avaliar o “rendimento” do sistema na gestão correcta das transmissões. Esta métrica é dada pela seguinte expressão:

$$Razão_serv_OTA = \frac{Th_serv}{OTA} \quad (4-12)$$

- Serviço satisfeito

Esta métrica corresponde ao número de bits que foram recebidos correctamente e com atraso não superior ao permitido pelo serviço. É obtido somando os bits de todos os blocos recebidos correctamente de cada um dos serviços com atraso não superior ao limiar a dividir pelo tempo total da simulação. Esta métrica é dada pela seguinte expressão:

$$Serv_satisf = \frac{\sum_{j=1}^N Serv_satisf_{cell_j}}{N} \quad (4-13)$$

Em que N é o número de células consideradas na simulação e:

$$Serv_satisf_{cell_j} = \frac{\sum_{l=1}^{l_{max}} P_{bits}(l)}{T_o} \quad (4-14)$$

Sendo:

$P_{bits}(l)$ = Tamanho do l -ésimo pacote recebido correctamente com atraso inferior ao máximo permitido para o serviço;

T_o = Duração da simulação;

l_{max} = Número de pacotes recebidos correctamente com atraso inferior ao atraso máximo permitido para o serviço.

- Razão do serviço satisfeito

Esta métrica dá razão entre *Serviço satisfeito* e o *Throughput de serviço*. Esta métrica permite avaliar o “rendimento” do sistema na entrega de blocos ou pacotes dentro dos atrasos estabelecidos. Esta métrica é dada pela seguinte expressão:

$$Razão_serv_satisf = \frac{Serv_Satisf}{Th_serv} \quad (4-15)$$

- Número médio de transmissões por bloco

Esta métrica dá o número médio de transmissões por cada bloco em todo o sistema. A média é feita em todos os utilizadores. Esta métrica é dada pela seguinte expressão:

$$Avrg_NTx = \frac{\sum_{j=1}^N Avrg_NTx_{cell_j}}{N} \quad (4-16)$$

Em que N é o número de células consideradas na simulação e:

$$Avrg_NTx_{cell_j} = \frac{NTx_{cell_j}}{NRx_correct_{cell_j}} \quad (4-17)$$

Sendo:

NTx_{cell_j} = Número transmissões efectuadas na célula j

$NRx_correct_{cell_j}$ = Número de blocos recebidos correctamente na célula j ;

4.5. Resultados

O desempenho do DRA baseado no *scheduling* de prioridade apresentado na secção 4.3. é comparado com *scheduling* que tende a maximizar o *Throughput* do sistema,

scheduling este baseado na selecção de utilizadores com maior SIR, como apresentado na secção 4.2.2.

Os parâmetros da função de prioridade, isto é, os valores alvo e limiar do SIR, factor de atraso e o número de transmissões associado ao processo H-ARQ foram seleccionados com base nos atributos de qualidade de serviço do tráfego de Voz e Web e tabelas de SIR versus BLER do sistema do projecto MATRICE para a interface de valor actual. Foram escolhidos os valores de referência para os parâmetros da função de prioridade, que oferecem uma solução equilibrada relativamente *Throughput* do sistema e aos requisitos de serviço. Os parâmetros e os respectivos valores de referência estão apresentados na Tabela 4-2

Tabela 4-2. *Scheduling* de prioridade – Parametrização de referência.

SIR - Alvo	-13.5 dB (Web); -13.9 dB(Voz)
SIR – Limiar (sobre o alvo)	15 dB
Factor de prioritização do atraso	0.75
H-ARQ Número de transmissões	1 Tx p/ Voz e 3 Tx. p/ Web

Os valores alvo do SIR para ambos os serviços correspondem a valores de SIR que segundo a tabela da camada física que se atinge o BLER alvo para cada um dos serviços. Estes valores são -13.5dB para o serviço de Web e -13.9dB para o serviço de voz. Relativamente ao atraso, a função é priorizada quando o atraso do pacote atingir 75% do atraso máximo permitido pelo serviço. Consideram-se 3 transmissões como um compromisso razoável entre o atraso que advém das retransmissões e o número de transmissões para combater os erros inseridos pelo canal.

Para se perceber o efeito dos valores destes parâmetros no desempenho do sistema, apresenta-se para efeitos de comparação, resultados do desempenho do sistema para outras parametrizações. Nestas simulações altera-se somente valor de um dos parâmetros da função de prioridade e o resultado é comparado com o dos parâmetros de referência. Os valores destas parametrizações são apresentados na Tabela 4-3 que identifica a simulação a que correspondem.

Tabela 4-3. Simulações com valores dos parâmetros de prioridade para comparação.

Identificação da Simulação	Parâmetro Modificado	Valor do Parâmetro
Simulação 1	SIR - Alvo	-13.5 (Web); -13.9 (Voz)
	Limiar do SIR	8dB
	Factor de priorização do atraso	0.75
	H-ARQ Número de transmissões	1 Tx p/ Voz e 3 Tx. p/ Web
Simulação 2	SIR - Alvo	-13.5 (Web); -13.9 (Voz)
	SIR – Limiar (sobre o alvo)	15dB
	Factor de atraso	0.3
	H-ARQ Número de transmissões	1 Tx p/ Voz e 3 Tx. p/ Web
Simulação 3	SIR - Alvo	-13.5 (Web); -13.9 (Voz)
	SIR – Limiar (sobre o alvo)	15dB
	Factor de priorização do atraso	0.75
	Número de transmissões no processo H-ARQ	1 Tx p/ Voz e 6 Tx. p/Web

Os resultados são apresentados da seguinte forma: na secção 4.5.1 apresentam-se os resultados obtidos com o *Scheduling* de prioridade usando os parâmetros de referência; na secção 4.5.2 apresenta-se resultados do *scheduling* por SIR máximo e na secção 4.5.3 apresentam-se resultados obtidos com *Scheduling* de prioridade com os parâmetros segundo a Tabela 4-3.

4.5.1 *Scheduling* de prioridade com os parâmetros de referência

A Figura 4-11 apresenta a função distribuição acumulada (CDF) do BLER e CDF do atraso de transferência dos blocos de dados dos utilizadores obtidos com o *scheduling* de prioridade e parâmetros de referência. Os resultados mostram que para os utilizadores do serviço de voz, em média, 68% dos blocos são obtidos dentro do atraso e que perto de 20% dos blocos são recebidos dentro da probabilidade erro estabelecida.

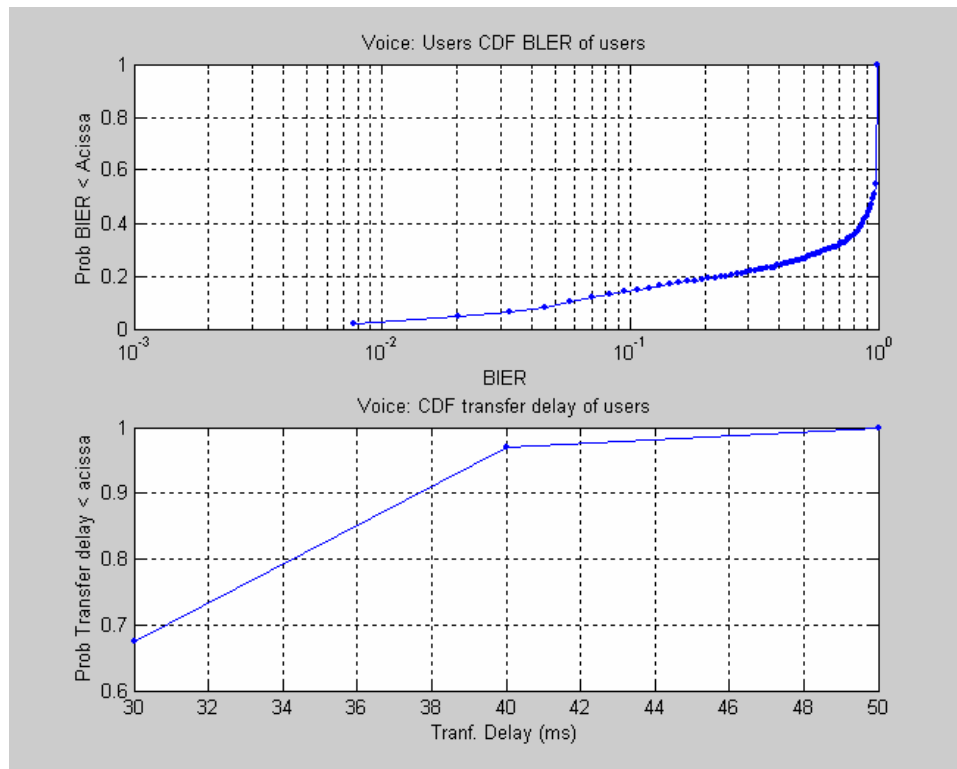


Figura 4-11. Serviço de voz: Função distribuição do BLER e atraso de transferência.

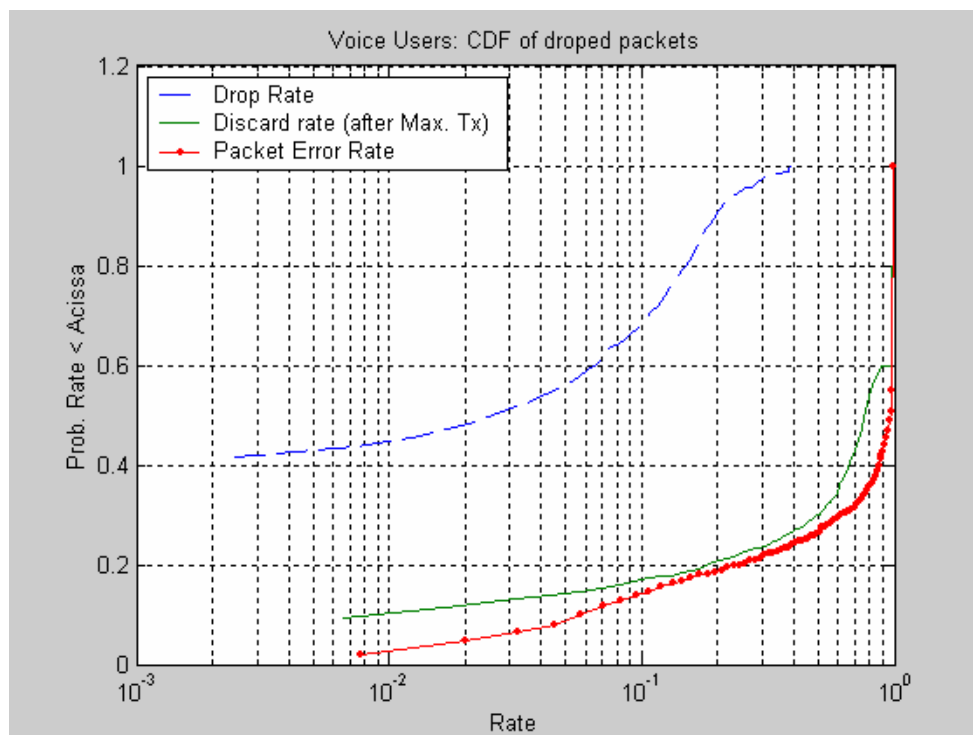


Figura 4-12. Serviço de voz: Função distribuição – Taxa de pacotes descartados.

Para serviços tempo-real como é o caso de serviço Voz a taxa de erros de blocos obtido corresponde não só aos pacotes recebidos erradamente, mas também aos pacotes eliminados da fila por excederem o tempo limite de espera. A Figura 4-12 compara a taxa de erro final com as taxas de erro residual e de pacotes eliminados na fila por atingirem o tempo limite. A maior aproximação da curva do BLER residual à do BLER final mostra que os blocos descartados após terem atingido o número máximo de transmissões (erradas) tem o maior peso nos erros obtidos, em relação aos pacotes eliminados da fila por atingirem o atraso máximo.

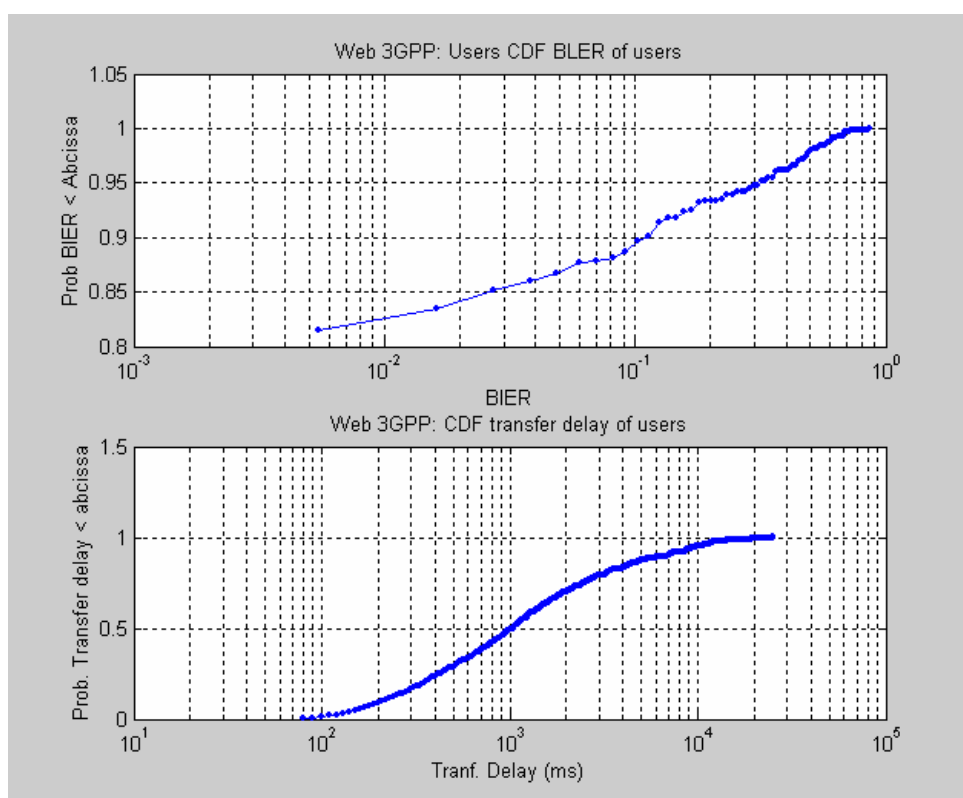


Figura 4-13. Serviço de Web: Função distribuição do BLER e atraso de transferência.

A Figura 4-13 apresenta CDF do BLER e CDF do atraso de transferência dos blocos de dados dos utilizadores obtidos com o *Scheduling* de prioridade e parâmetros de referência para utilizadores Web. Os resultados mostram que para os utilizadores de Web, em média 20% dos blocos são obtidos dentro do atraso estipulado e que perto de 82% dos blocos são recebidos dentro da probabilidade erro estabelecida. A análise a estes resultados sugere que a baixa probabilidade de pacotes de Web serem recebidos

com atraso dentro do estabelecido pelos requisitos do serviço, terá a ver com as retransmissões e uma consequente relativo aumento da densidade de tráfego de Web no sistema resultante da acumulação de pacotes. Por outro lado, os melhores resultados na probabilidade de erro do bloco no tráfego Web relativamente ao tráfego de Voz têm a ver precisamente com o ganho que é obtido no sistema com retransmissões no processo H-ARQ.

4.5.2 Scheduling pelo SIR máximo

A Figura 4-14 e Figura 4-15 apresentam CDF do BLER e CDF do atraso de transferência dos blocos de dados dos utilizadores de voz e Web respectivamente obtidos com o *scheduling* pelo SIR máximo.

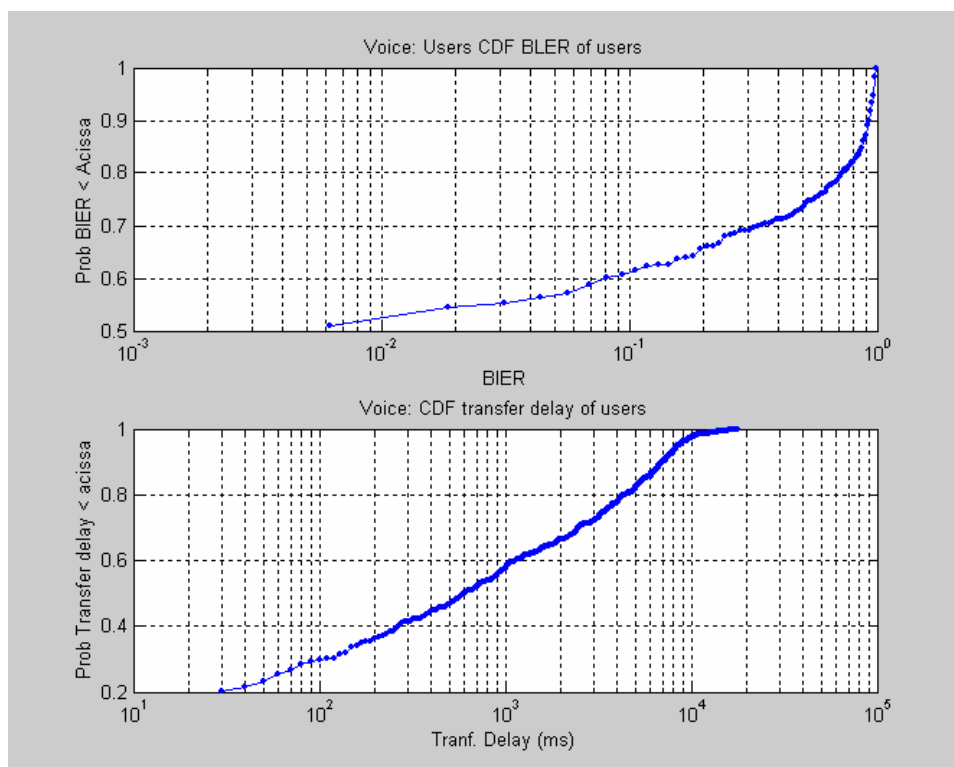


Figura 4-14. Serviço de voz: BLER e atraso de transferência.

Para o tráfego de voz os resultados na Figura 4-14 mostram que em média, 20% dos blocos são obtidos dentro do atraso estipulado pelo serviço e perto de 55% dos blocos são recebidos dentro da probabilidade erro estabelecida.

Comparando estes resultados com os resultados obtidos com *scheduling* de prioridade com parâmetros de referência, constata-se que com o *scheduling* baseado em SIR máximo, há uma redução de cerca de 50% na probabilidade de blocos serem recebidos dentro do atraso estabelecido, isto é, 20% da probabilidade para *scheduling* de SIR máximo contra cerca de 70% para *scheduling* de prioridade. Relativamente ao BLER, no entanto, o *scheduling* de SIR máximo dá origem a um sistema mais fiável com 55% de blocos a serem obtidos com BLER inferior ao limiar estabelecido pelo serviço contra 10% obtido pelo *scheduling* de prioridade.

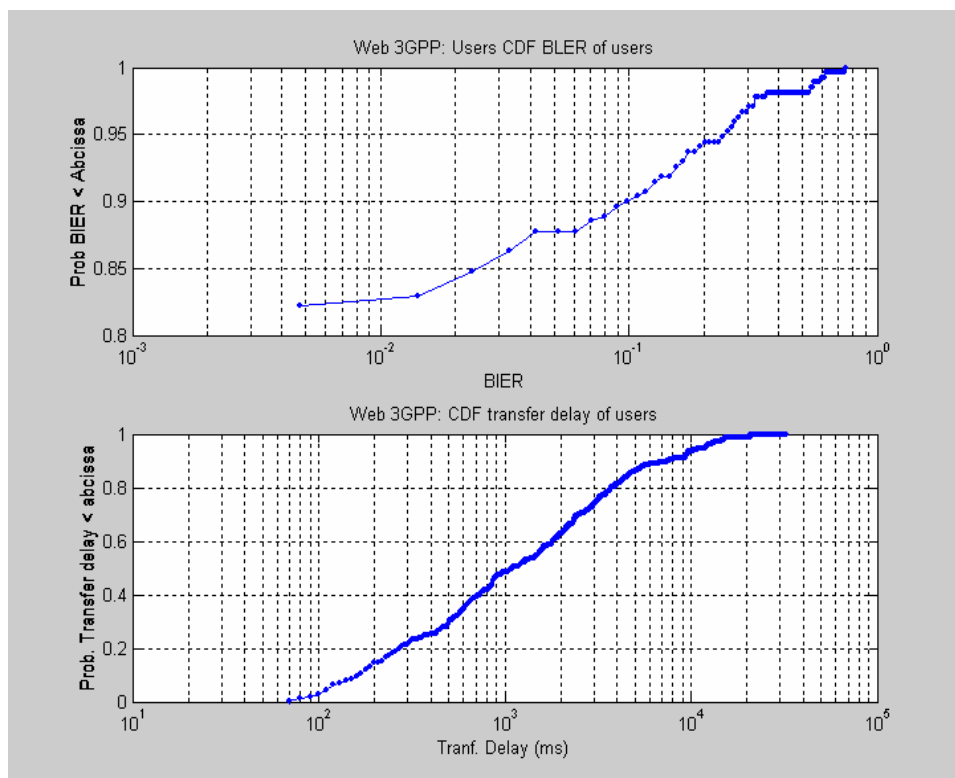


Figura 4-15. Serviço de Web. BLER e atraso de transferência.

Para o tráfego Web, com resultados apresentados na Figura 4-15, 20% dos blocos são recebidos dentro do atraso estipulado e cerca de 83% de blocos são recebidos com probabilidade de erro inferior ao valor alvo para o serviço. Comparando estes resultados com os do *scheduling* de prioridade com parâmetros de referência, constata-se que os resultados relativamente ao atraso são muito próximos (cerca de 20% dentro do permitido), o que leva a reforçar que o atraso é condicionado grandemente pela carga de tráfego que resulta da acumulação de pacotes no sistema devido às retransmissões.

4.5.3 Scheduling de prioridade – Outras parametrizações

Nesta secção apresentam-se resultados dos efeitos dos parâmetros da função de prioridade. Para tal comparam-se os resultados obtidos com o *Scheduling* de prioridade com parâmetros de referência com outras parametrizações, conforme a Tabela 4-3, analisando-se efeito de cada parâmetro isoladamente. Na secção 4.5.3.1 correspondente à Simulação 1, compara-se o caso em que o limiar do SIR é reduzido de 15dB para 8dB, tornando o sistema menos selectivo. Na secção 4.5.3.2 o factor de atraso é alterado de 0.75 para 0.3, priorizando blocos quando o atraso do bloco for de 30% do atraso máximo fazendo com que o sistema seja mais exigente no que se refere à priorização no atraso. Na secção 4.5.3.3 os resultados referem-se ao caso em que se altera o número máximo de transmissões por bloco de 3 para 6. Este último caso é aplicado somente ao tráfego Web uma vez que o tráfego de voz, com características tempo-real, não permite retransmissão.

4.5.3.1 Simulação 1

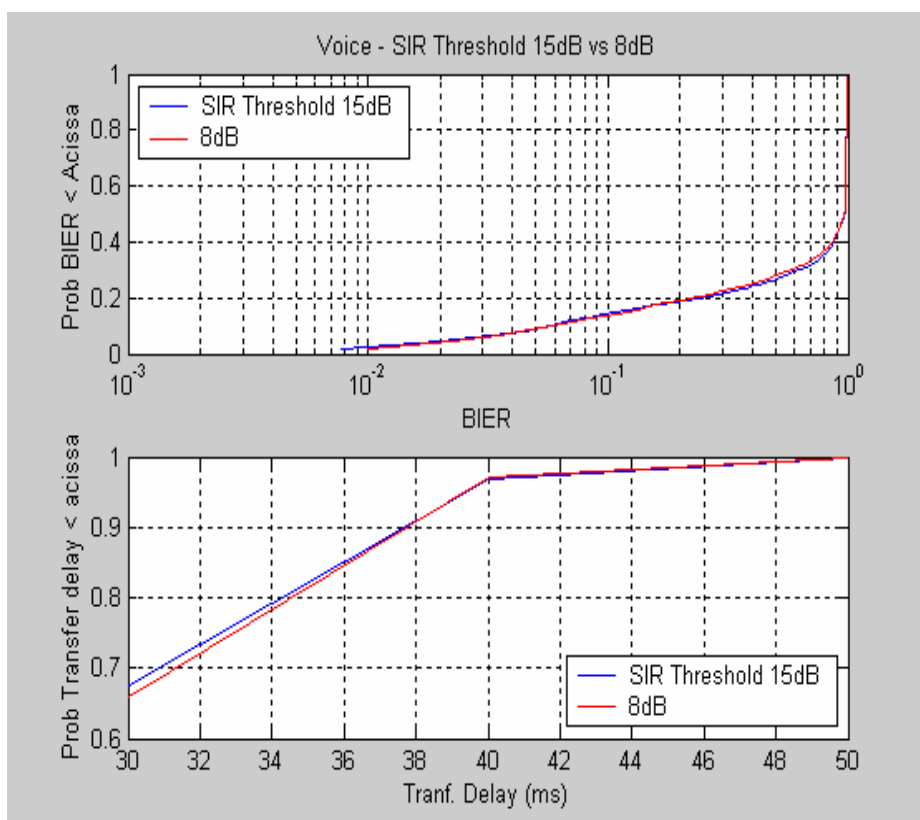


Figura 4-16. Serviço de voz: BLER e atraso de transferência.

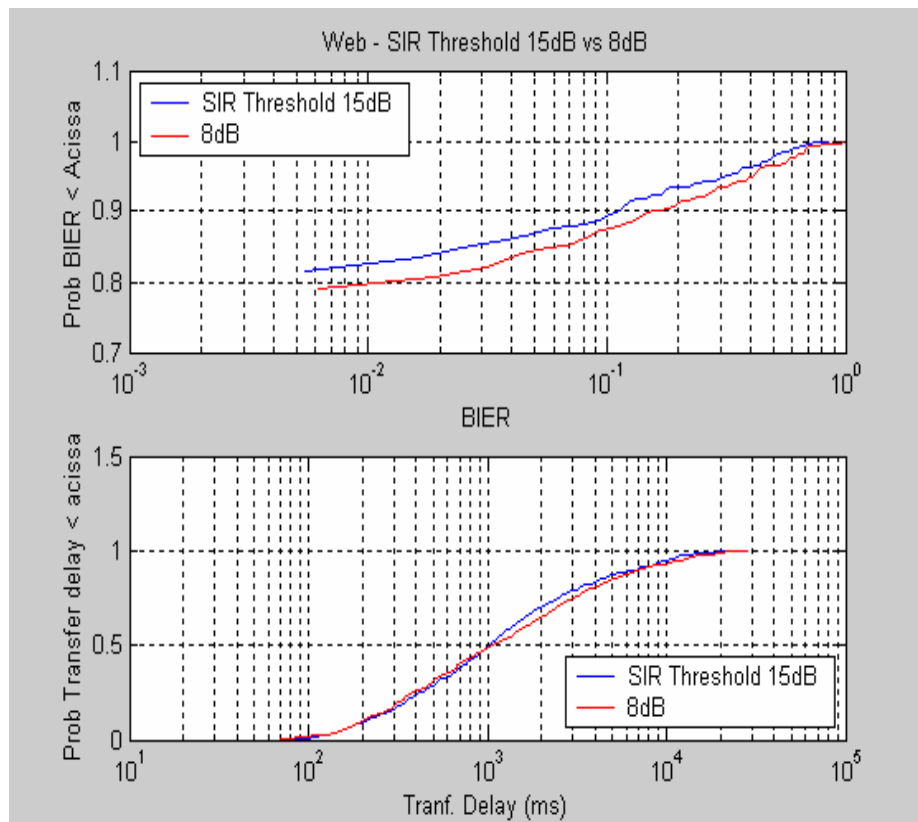


Figura 4-17. Serviço de Web: BLER e atraso de transferência.

Com limiar de 8dB na função de robustez na transmissão, isto é, sistema menos selectivo, aumenta o BLER para o tráfego Web, (curva a azul com valores superiores). Relativamente aos atrasos os resultados são muito próximos. Os resultados mostram que a robustez na transmissão afecta essencialmente a probabilidade de erro. No caso de tráfego de Voz os resultados são muito próximos, tanto no atraso como no BLER.

4.5.3.2 Simulação 2

Factor de atraso alterado de 0.75 para 0.3 na função de atraso.

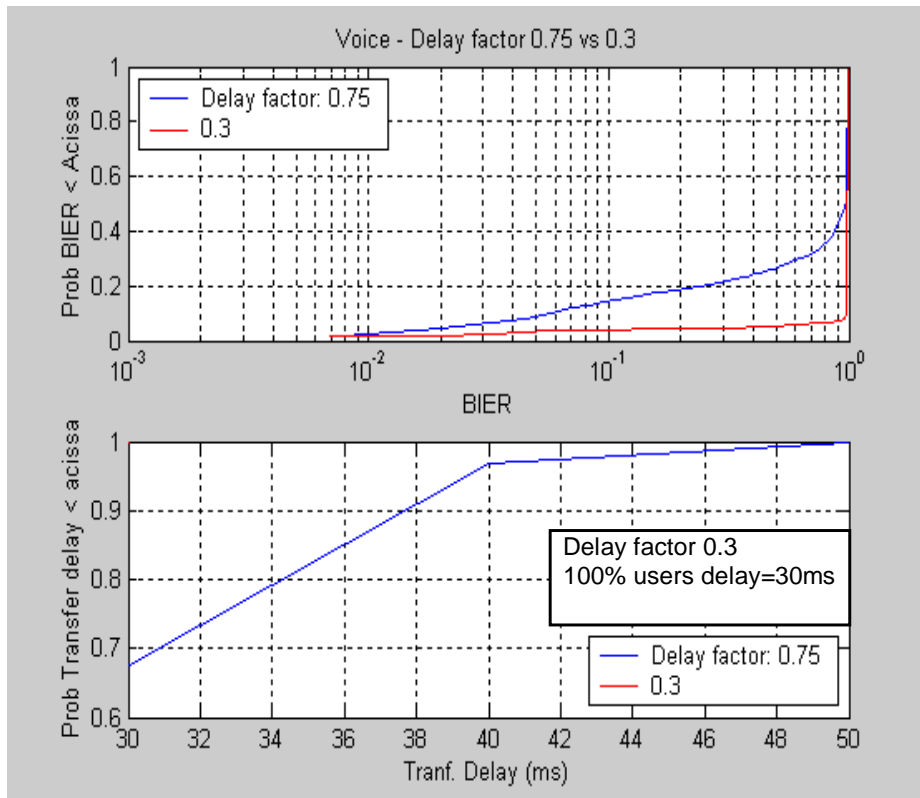


Figura 4-18. Factor de atraso 0.3 versus 0.75 – Serviço de voz.

Priorizando os pacotes a partir de 30% do valor do atraso máximo permitido pelo serviço, significa que se atribui maior peso a um requisito de camada superior (atraso) do que da camada física (SIR). O resultado obtido na Figura 4-18 mostra que no caso de tráfego de voz o desempenho melhora relativamente ao atraso, sendo que todos os pacotes são recebidos dentro do atraso máximo estipulado. No entanto o desempenho diminui relativamente à taxa de erros, que é menos no caso de priorização do pacote a 30% do atraso máximo.

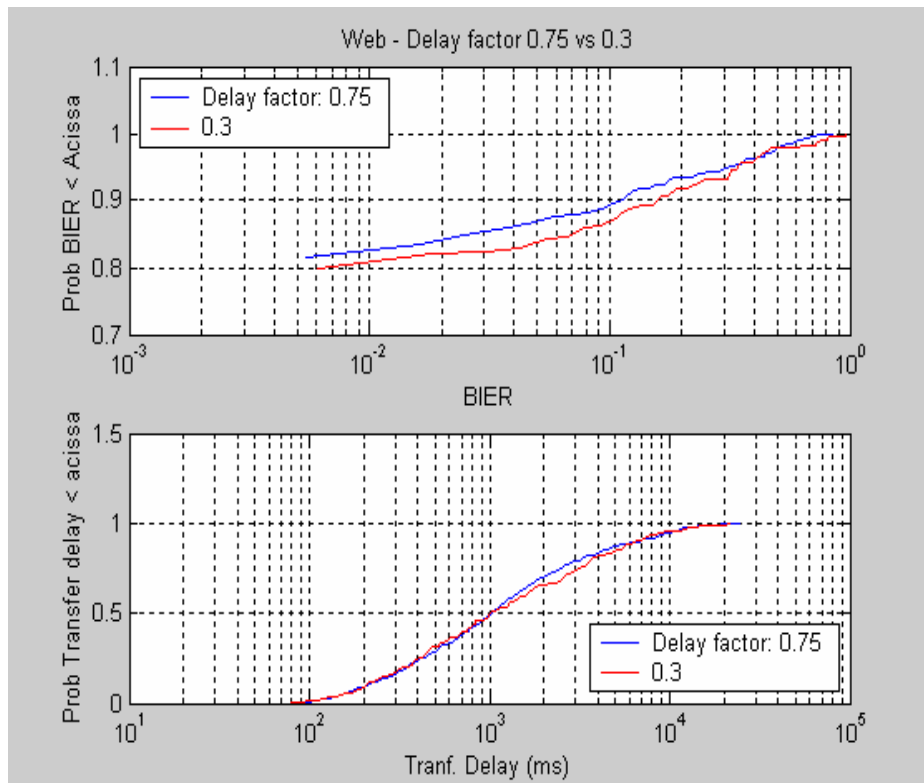


Figura 4-19. Factor de atraso 0.3 versus 0.75 – Serviço de Web.

Uma análise semelhante pode ser feita nos resultados apresentados na Figura 4-19 obtidos com o tráfego de Web, relativamente ao BLER. Relativamente ao atraso, os resultados obtidos mais uma vez não evidenciam grandes diferenças.

4.5.3.3 Simulação 3

Número máximo de transmissões por bloco: 3 transmissões versus 6 transmissões

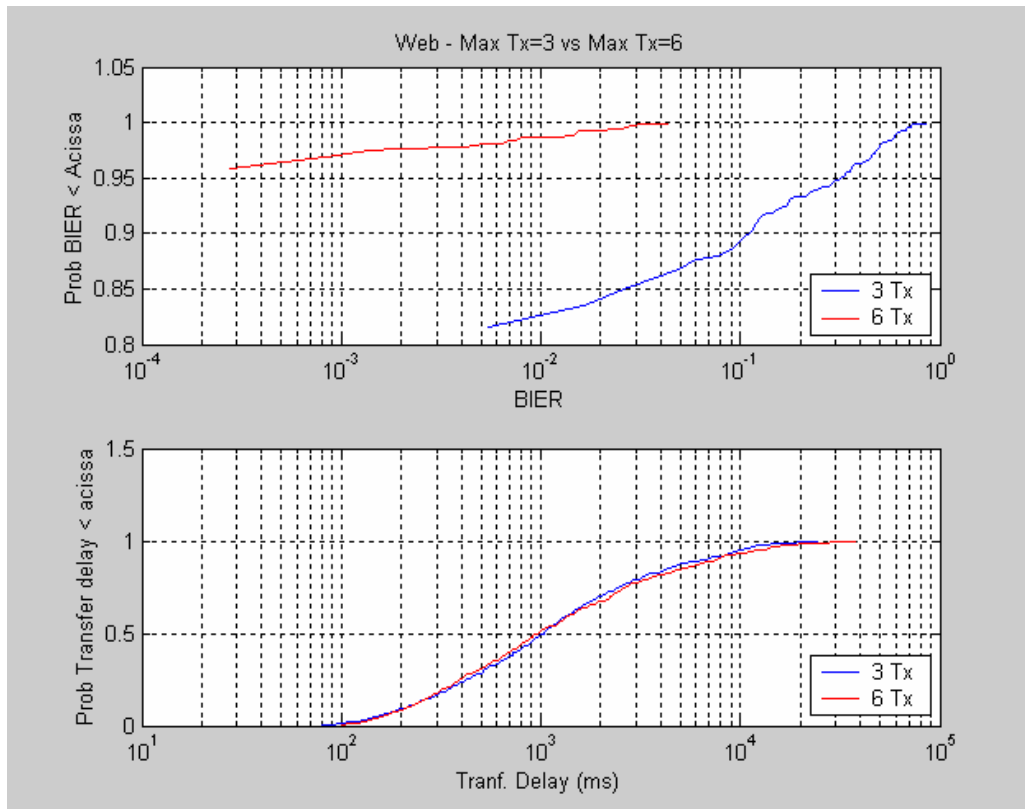


Figura 4-20. 3 Tx vs. 6 Tx. BLER e atraso de transferência.

Comparando os resultados do *scheduler* de prioridade para um número máximo de 3 transmissões com 6 transmissões para cada bloco do tráfego de Web, pode-se ver na Figura 4-20 que 98% dos blocos são recebidos com BLER abaixo do limiar para 6 transmissões, contra os 82% para 3 transmissões. Estes resultados demonstram claramente o ganho que é introduzido pelo ARQ e *Chase combining*.

4.5.4 Throughput do sistema

A Tabela 4-4 apresenta os resultados globais de *Throughput* a nível de sistema com os *scheduling* utilizados pelo sistema. Os resultados do *throughput* de sistema associados

aos resultados obtidos em termos dos utilizadores individuais apresentados na secção anterior, completam a análise do desempenho global do sistema.

Tabela 4-4: Comparação dos resultados de *Throughput* médio da célula.

Métrica (media por célula)	Prioridade Parâmetros de referência	SIR Máximo	Prioridade Factor atraso: 0.3	Prioridade Num tx = 6	Prioridade Limiar 8dB
OTA	566 kbps	588 kbps	580 kbps	596 kbps	592 kbps
Th. de Serviço	400 kbps	426 kbps	397 kbps	415 kbps	392 kbps
Razão Th. Serv/OTA	0.707	0.724	0.684	0.696	0.661
Serviço Satisfeito	270 kbps	277 kbps	269 kbps	271 kbps	262 kbps
Razão ServSatisf /ThServ	0.676	0.650	0.678	0.653	0.668
Número médio de Tx p/ bloco (Web)	1.13	1.39	1.42	1.45	1.45

Comparando os resultados de *throughput* absolutos, OTA e do *Throughput* de serviço, o *scheduler* por SIR máximo corresponde ao sistema mais eficiente, com uma razão entre quantidade de dados recebidos correctamente e quantidade de dados transmitidos de 72.4% contra 70.7% obtidos com o *scheduling* de prioridade com os parâmetros de referência.

Analisando o *throughput* no caso de blocos recebidos correctamente e com atrasos dentro do estabelecido, o *scheduling* de prioridade com parâmetros de referência corresponde ao sistema mais eficiente, com uma razão entre a quantidade de dados recebidos correctamente e a quantidade de dados recebidos com atraso dentro do estabelecido pelo serviço 66.7% contra 65% obtido pelo *scheduling* por melhor SIR. Convém referir nesta análise que, embora o *scheduling* de prioridade com factor de atraso 0.3 tenha o valor mais elevado da razão *throughput* de serviço e *throughput* satisfeito, 67.8%, o sistema apresenta um *throughput* de serviço relativamente baixo, o que sugere um sistema menos eficiente em termos do aproveitamento da capacidade do sistema.

Os resultados do algoritmo de *scheduling* de prioridade na Tabela 4-4 mostram como o desempenho do sistema é afectado pelos parâmetros relativamente aos requisitos de serviço e *throughput*.

4.6. Discussão de resultados

O algoritmo de prioridade proposto combina informações do canal com requisitos de serviço. Este algoritmo foi avaliado pelos resultados do BLER e do atraso em termos de satisfação do utilizador individual e de *throughput* médio da célula. O *scheduling* baseado no algoritmo de prioridade é comparado com o *scheduling* que se baseia na selecção de utilizadores com melhor SINR, que optimiza o *throughput* da célula.

Os resultados mostram que em embora o *scheduling* baseado no SIR máximo forneça melhor desempenho em termos de *throughput* efectivo da célula, este não corresponde no entanto ao algoritmo mais justo, uma vez que utilizadores em melhores condições tendem a monopolizar o sistema. Isto é mais verdade se o atraso na entrega de pacotes é um requisito do tráfego. A análise combinada de resultados obtidos nos atributos de utilizadores satisfeitos, (BLER e atraso) e do *throughput* do sistema, mostram que o algoritmo proposto se revela num mecanismo mais adequado para *scheduling* de pacotes. Os resultados mostram que, comparado com o *scheduling* baseado no SIR máximo, o algoritmo de prioridade proposto tende a balancear o grau de satisfação de utilizadores com o *throughput* efectivo da célula. Resultados numéricos mostram um aumento de 2.5% na satisfação de utilizadores, com o algoritmo proposto (medido pela razão entre *Throughput Satisfeito* e *Throughput de Serviço*) é obtido à custa de uma diminuição de 1.7% no *throughput* da célula (medido pela razão entre *Throughput de Serviço* e OTA). Por conseguinte, o mecanismo de *scheduler* proposto fornece um compromisso entre a qualidade de serviço e o *throughput* do sistema. A partir da informação de variáveis de estado, isto é, qualidade de canal, atraso do pacote e o número de transmissões no momento de decisão o *scheduler* atribui peso a cada uma destas entradas de modo a obter o compromisso desejado.

É conveniente chamar a atenção de que os resultados foram obtidos sem inclusão de uma política de admissão de utilizadores no sistema. No caso de admissão no sistema de utilizadores homogéneos (inclusão de CAC), ou seja selecção de utilizadores com boas condições de canal, acredita-se que o algoritmo terá resultados superiores aos

apresentados no que se refere à satisfação de utilizadores. O algoritmo de CAC decidiria como alcançar um compromisso entre os utilizadores descartados, bloqueados e admitidos no sistema para uma determinada carga de tráfego. Efectivamente, em chamadas de pacotes é desejável que se bloqueie utilizadores em vez de os descartar, sendo que para isso o CAC deverá ter informação à volta da qualidade do canal dos utilizadores admitidos no sistema e média de atrasos que os pacotes sofrem na fila. Com estas informações o CAC decidirá se há recursos suficientes para satisfazer os requisitos de serviço dos utilizadores admitidos. À semelhança do scheduler, se a política de CAC se basear nas medidas de sinal, poderá melhorar a *throughput* do Serviço mas à custa do atraso médio dos pacotes de outros utilizadores.

É patente com este trabalho que a alocação dinâmica de recursos é um processo complexo em que o *throughput* final do sistema é dependente não só as políticas de *scheduling*, como também a adaptação da ligação que inclui escolha adequada da modulação e o processo HARQ.

5. Conclusão

Este trabalho é um contributo na área de alocação dinâmica de recursos rádio para sistemas 4G baseados na tecnologia de acesso MC-CDMA.

Após a introdução geral e breve no primeiro capítulo, apresentou-se no capítulo 2 a evolução das comunicações móveis, incluindo as tendências de serviços e factores que poderão contribuir para o seu sucesso, bem como a componente de banda larga e técnicas de suporte associadas a um sistema dita da 4ª geração. O capítulo 3 descreve o simulador de sistema utilizado para avaliar o desempenho da componente de banda larga para sistemas de 4ª geração baseados no MC-CDMA, mais concretamente o sistema do projecto MATRICE. Um compromisso entre fiabilidade do simulador e a sua complexidade levou à implementação de interfaces com a camada física e IP, detalhadas no capítulo 3. O capítulo 4 apresenta o algoritmo de *scheduling* proposto e os resultados numéricos obtidos com a avaliação do seu desempenho.

O objectivo do trabalho apresentado nesta dissertação é explorar a flexibilidade inerente à gestão de recursos nas redes de acesso baseados em MC-CDMA, no espaço slot de tempo, código e frequência, avaliando algoritmos atribuição de recursos a pacotes com o objectivo de não só maximizar o *throughput* do serviço, mas também manter em média um número de utilizadores satisfeitos. Por conseguinte a solução de alocação dinâmica de recursos visa otimizar o *throughput* da célula para um determinado número de utilizadores satisfeitos e para determinada classe de serviço.

O algoritmo de *scheduling* proposto baseia-se na priorização e selecção de pacotes com base nos requisitos de serviço, provenientes de camadas superiores e informações da camada física. Este algoritmo é um compromisso entre a qualidade de serviço e o

throughput do sistema. Através da informação da qualidade do canal, atraso pacote e o número de transmissões, o algoritmo dá um peso a cada uma destas entradas de forma para obter o compromisso desejado. O principal benefício deste esquema é a flexibilidade inerente para que uma forma relativamente delicada seja possível *afinar* o *scheduler* para um controlo total sobre o *throughput* do sistema.

Este algoritmo é comparado em termos de satisfação de utilizadores e *throughput* da célula, com o algoritmo proposto para maximizar o *throughput* da célula no HSDPA do UMTS. A análise combinada de resultados obtidos nos atributos de utilizadores satisfeitos e do *throughput* do sistema, mostram que o algoritmo proposto revela-se num mecanismo mais adequado para *scheduling* de pacotes e que o aumento da satisfação de utilizadores, medido pelo número de utilizadores satisfeitos, é feito com base na diminuição do *throughput* da célula. Os resultados mostraram que o aumento de 2.5% de utilizadores satisfeitos é obtido com uma diminuição do *throughput* de célula de 1.7%. Os resultados apresentados foram obtidos sem incluir no sistema nenhuma forma de controlo de admissão de utilizadores, o que por certo melhora o desempenho global do algoritmo proposto.

Neste trabalho foram identificados alguns pontos importantes dentro dos objectivos daquilo que pretende com a alocação dinâmica de recursos e foram apontados alguns tópicos para o trabalho futuro.

Tópicos de trabalho futuro

Entre os pontos que julgamos ser relevantes para o trabalho futuro destacam-se:

- Inclusão de algoritmos de Controlo de Admissão de Utilizadores (CAC).

A inclusão de um algoritmo de Controlo de Admissão de Utilizadores poderá fazer o sistema alcançar um compromisso entre os utilizadores descartados, bloqueados e admitidos no sistema, com o objectivo de manter uma carga média de tráfego no sistema. Nas chamadas de pacotes, é desejável o bloqueio de utilizadores em vez de os descartar, sendo que para isso o CAC deverá ter informação à volta da qualidade do canal dos utilizadores admitidos no sistema e média de atrasos que os pacotes sofrem na fila. Com informações da carga de tráfego e das condições de canal de cada utilizador, o CAC decidirá se há recursos suficientes para satisfazer os requisitos de serviço de todos os utilizadores admitidos.

- Análise otimizada de número máximo de pacotes de cada serviço em simultâneos num slot de tempo

O algoritmo proposto balanceia os requisitos de serviço com o estado do canal na selecção do pacote a servir. A potência com que cada bloco de dados é transmitido é igual à fracção da potência total relativamente ao número de blocos. Esta forma de alocar recursos não garante qualidade de serviço embora favoreça aos pacotes em condições de serem satisfeitos. Um estudo interessante passaria pela optimização do número máximo de blocos que deverão ser transmitidos em cada slot por forma a que a potência alocada satisfaça a qualidade de serviço. O algoritmo de Viterbi poderá ser o princípio usado nesta optimização. Uma análise analítica deste processo vem apresentada em [42].

- Complexidade inerente ao recurso elementar

Idealmente os pacotes IP deveriam ser do tamanho de cada bloco rádio. No entanto os pacotes têm tamanhos diferentes e variados, e a capacidade dos blocos rádio são adaptadas exclusivamente à qualidade do canal. Em média, quanto maior é o número de códigos de espalhamento considerado em cada TTI, maior é a granularidade do espaço de recursos, e consequentemente há um aumento na flexibilidade. Em contrapartida aumenta também a carga de sinalização associada, que não foi considerada neste estudo. O DRA com a granularidade de $2(\text{slots}) \times 30(\text{códigos}) = 60$ recursos para alocar por TTI, idealmente permite recursos serem partilhados em simultâneo por 60 utilizadores num único TTI. O HSDPA pressupõe alocação inteira da trama a um utilizador, isto é, recurso único é partilhado pelos utilizadores em cada TTI.

Um estudo da complexidade associada ao recurso elementar é necessário por forma a explorar a flexibilidade e seu impacto na complexidade do sistema e na largura de banda que é usada na sinalização. A granularidade dos recursos em cada TTI poderá ser um compromisso entre a flexibilidade e a complexidade do DRA.

- Técnicas alternativas de HARQ

O HARQ influencia o *throughput* do sistema e intrinsecamente o BLER residual como se viu nos resultados da secção 4.5.3.3. Esquemas de HARQ com Redundância Incrementada [38, 43] apresentam uma abordagem diferente do *Chase combining*, reflectindo numa redução da carga de dados na retransmissão e consequente

aumento do *throughput* do sistema. Um estudo do desempenho do sistema mediante outros esquemas de HARQ poderá ser levado a cabo.

Anexo I – Descrição do simulador

O simulador foi idealizado para a realização de estudos a nível de sistema, mais concretamente a avaliação da gestão de acesso e utilização dos recursos rádio, controlo de mobilidade etc. Este simulador foi desenvolvido pela Universidade de Surrey, um dos parceiros do projecto MATRICE, e os modelos de canal e modelos de gestão de recursos rádio foram incluídos pela France Telecom R&D [9]. O modelo de simulação inclui mecanismos para simulação de situações com relativa aproximação aos ambientes reais. O simulador é usado na direcção de downlink e inclui capacidades para simular e avaliar o desempenho esquemas de modulação de elevada ordem, ARQ Híbrido como proposto para o HSDPA do UMTS e esquemas de suporte ao *scheduling* para priorização de pacotes. Em detalhe o simulador inclui gerador de tráfego de pacotes baseados em modelos da 3GPP, objectos que executam os mecanismos de alocação dinâmica de recursos, modelos de canal para determinados ambientes e mecanismos para distribuição de dos móveis e estações base e dinâmica dos móveis.

Modelos e módulos

Os vários módulos que incluem o modelo de simulação estão representados na Figura A1-1 e consiste nos detalhes apresentados a seguir.

- Distribuição de células, móveis e modelos de mobilidade

Modelo de distribuição multicelular com células hexagonais com número variável de anéis de 1 a 4 (7 a 61 células respectivamente) [44, 45]. A mobilidade está associada ao ambiente de simulação. Três ambientes são incluídos, o ambiente

indoor, o ambiente urbano e o ambiente rural com velocidades do móvel de 3, 60 e 300 km/h respectivamente.

- Tráfego

Modelos de tráfego de pacotes de Web, Voz, sequência de vídeo e FTP baseados em modelos da 3GPP. Estes modelos estão descritos em pormenor no Anexo II.

- Alocação dinâmica de recursos

Esquemas de gestão dos recursos rádio que incluem modulação e codificação adaptativa, n canais H-ARQ paralelos, algoritmos de *scheduling* para, algoritmos de *handover* e controlo de admissão de utilizadores.

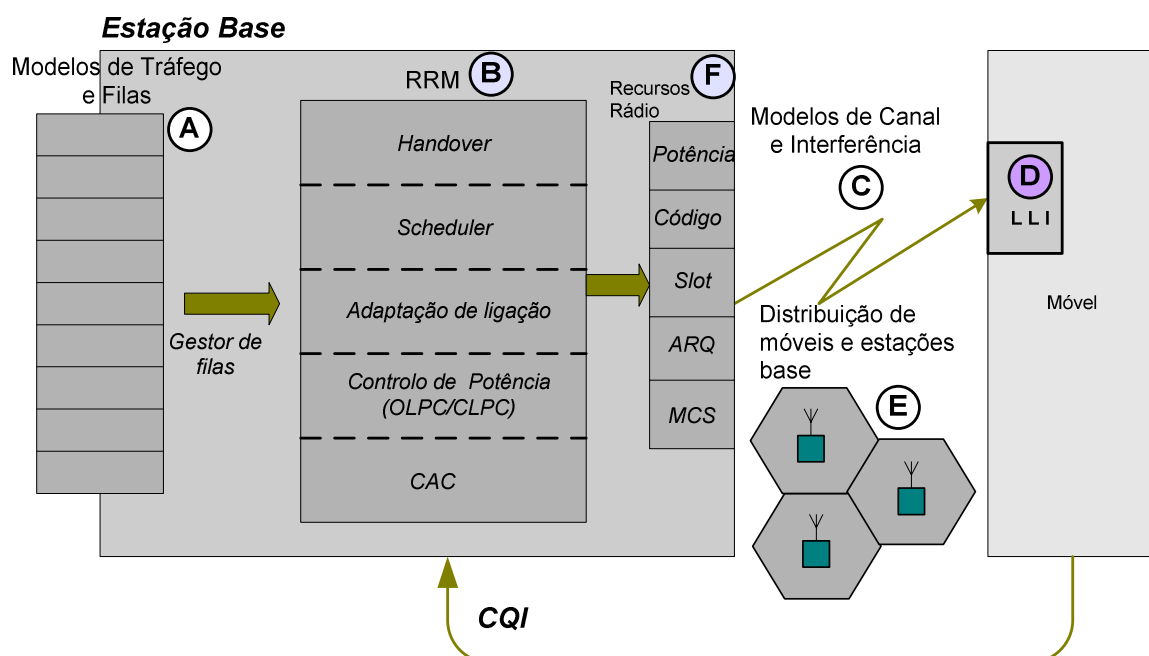


Figura A1-1. Diagrama de blocos do simulador.

- Modelos de propagação

Os modelos de propagação são baseados em modelos de COST 259 para o UMTS (banda dos 2GHz) e adaptado para a banda dos 5GHz, uma banda provável para os sistemas 4G [25, 46]. O canal rádio entre uma determinada estação base e um móvel é obtido por três componentes: as perdas por propagação (*path loss*), o desvanecimento lento (*shadowing*) e o desvanecimento rápido (*fast fading*).

A perda por propagação (PL) é dada em dB (Expressão A1.1) e inclui uma componente exponencial, $plExpoente$, e uma componente constante, $plConstante$, tal que:

$$PL[dB] = plExpoente * \log_{10}\left(\frac{d[m]}{1000}\right) + plConstante \quad (A1.1)$$

em que $d[m]$ é a distância em metros entre a estação base e o móvel.

Os valores da componente exponencial e da componente constante usados em cada um dos ambientes, *Indoor*, urbano e rural são apresentados na Tabela A1.1. Para o ambiente *Indoor* o modelo foi derivado de medidas da France Télécom R&D efectuadas em áreas extensas *Indoor* na banda dos 5GHz [23] com resultados obtidos para situações com linha de vista (LOS) e sem linha de vista (NoLOS).

Tabela A1.1: Parâmetros da perda por propagação para a banda dos 5GHz.

Ambiente		$plExpoente$	$plConstante$
<i>Indoor</i>	<i>Los</i>	39	46,73
	<i>NoLos</i>	31.75	46,43
Urbano		28	141,52
Rural		28	152,21

O desvanecimento lento é determinado segundo a distribuição log-normal e o modelo tem como componentes o desvio padrão e a distância máxima de decorrelação. Os valores do desvio padrão e distância máxima de correlação para os 3 ambientes incluídos no simulador estão representados na tabela A1.2.

Tabela A1.2: Parâmetros da para o modelo de desvanecimento lento.

Ambiente	Desvio padrão	Distância de decorrelação
<i>Indoor</i>	6 dB	5 m
Urbano	8 dB	20 m
Rural	12 dB	50 m

A componente de desvanecimento rápido (*fast fading*) é gerada no simulador usando o modelo de Jakes modificado para a geração de componentes multipercurso de Rayleigh independentes [47]. O modelo de canal multipercurso é usado no sector de serviço enquanto que é assumido desvanecimento plano para as células vizinhas.

- Interferência

A interferência em cada móvel MS_i é calculada a partir da potência de sinal recebida da estação de referência, BS_j e de cada estação base vizinha BS_k , e inclui também o ruído térmico na cadeia de recepção. A interferência é calculada segundo a fracção de potência alocada a cada unidade de recurso (RU), correspondente a um código. O cálculo da interferência vem representado na expressão (A1.2).

$$RU_SIR(i, j) = \frac{g(i, j) \times P_{code} \times \sum_{l=1}^{N_{path}} |h(i, l)|^2}{PL(i, j) \times SH(i, j) + P_{noise} + \sum_{k=1, k \neq j}^{N_{BS}} \frac{g(i, j) \times P_{max} \times |\gamma(i, k)|^2}{PL(i, k) \times SH(i, k)}} \quad (A1.2)$$

Em que:

- P_{code} é a potência de transmissão por código;
- P_{noise} é a potência de ruído térmico na cadeia de recepção;
- P_{max} é a potência máxima de transmissão da BS ;
- $PL(i, j)$ é a perda por propagação entre o móvel MS_i e a estação de referência, BS_j ;
- $SH(i, j)$ perdas de desvanecimento lento entre o móvel MS_i e a estação de referência, BS_j ;
- $g(i, j)$ é o ganho da antena da BS ;
- N_{BS} é o número de sectores / estações no sistema;
- $h(i, l)$ é a amplitude do $l^{ésimo}$ percurso entre MS_i e o sector j ;
- N_{path} é o número de percursos do canal multi-percurso do sector de serviço;
- $\gamma(i, k)$ é amplitude do percurso entre o móvel MS_i e a BS do sector vizinho k .

- Interface com a camada física

O simulador usa entradas de tabelas de BLER fornecidas através de simulações da camada física com os pormenores descritos no capítulo 3.

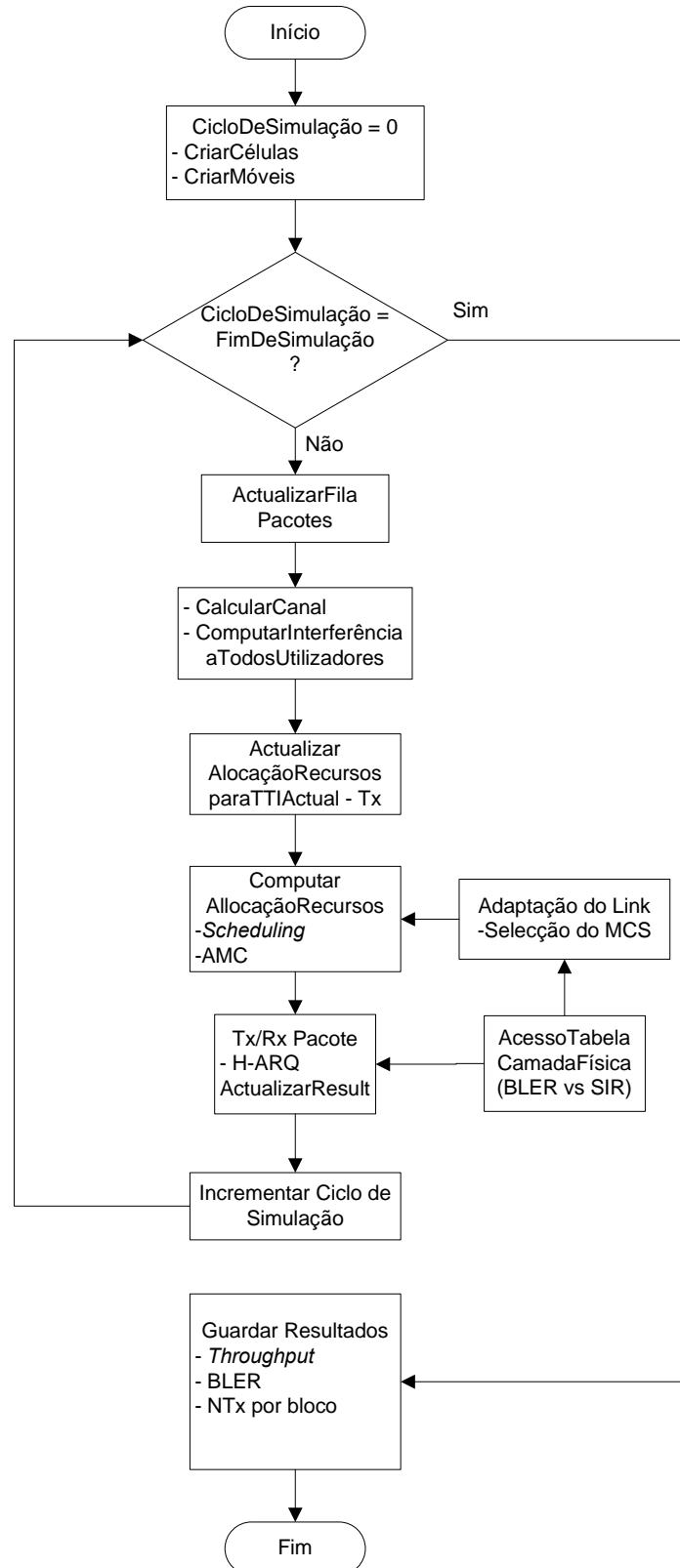


Figura A1-2. Fluxograma da simulação.

Arquitectura

A Figura A1.2 apresenta o fluxograma do objecto principal do simulador, e descreve o processo sequencial de simulação. O simulador foi desenvolvido em C++ e consiste num número de objectos (módulos) associado a cada acção descrito no fluxograma. As células e utilizadores são criados no início da simulação, e o tráfego de cada utilizador é inicialmente aleatório, o que significa que se assume que sistema se encontra no estado estacionário a partir do início da simulação. A simulação ocorre durante um número de ciclos, em que cada ciclo equivale um Intervalo de Tempo de Transmissão (TTI).

Capacidades inerentes

Como simulador de sistema, este simulador foi desenvolvido para avaliar os esquemas de gestão dos recursos rádio relacionados com o sistema de acesso MC-CDMA do do projecto MATRICE. O simulador inclui n canais H-ARQ com *Chase combining*, Modulação e Codificação adaptativa e esquemas de *scheduling* de pacotes. Apesar de incluir um esquema específico de gestão de recursos rádio, a capacidade fundamental deste simulador reside na capacidade relativamente simples de se poder alterar o esquema proposto e/ou avaliar o desempenho de sistema em circunstâncias particulares.

Saídas

No fim da simulação o simulador fornece os seguintes resultados em ficheiros de texto que serão processados para se obter resultados em termos estatísticos:

- *Throughput* pela interface ar de cada utilizador
- *Throughput* de serviço de cada utilizador
- Número médio de transmissões de bloco de cada utilizador
- Taxa de erros de blocos de cada utilizador
- Taxa de erros de blocos residual de cada utilizador
- Atraso na transmissão de blocos de cada utilizador

Anexo II – Modelos de tráfego

Modelo de Tráfego de Voz

O modelo de tráfego de voz é um modelo *on-off* com actividade e períodos de silêncio, ambos gerados segundo distribuição de Poisson. O valor médio para os períodos activos e de silêncio são de 1 e 1.3 segundos respectivamente. Estas características correspondem ao tráfego bi-direccional, isto é, tanto em *uplink* como em *downlink* [25, 41].

Modelo de tráfego de Web

O Tráfego de Web é gerado de acordo com o modelo descrito em [25]. O modelo para chamada de pacotes está ilustrado na figura A2.1, e os parâmetros para este modelo estão reproduzidos na Tabela A2.1. O controlo de ritmo de transmissão do TCP/IP é modelado de acordo com processo em malha aberta.

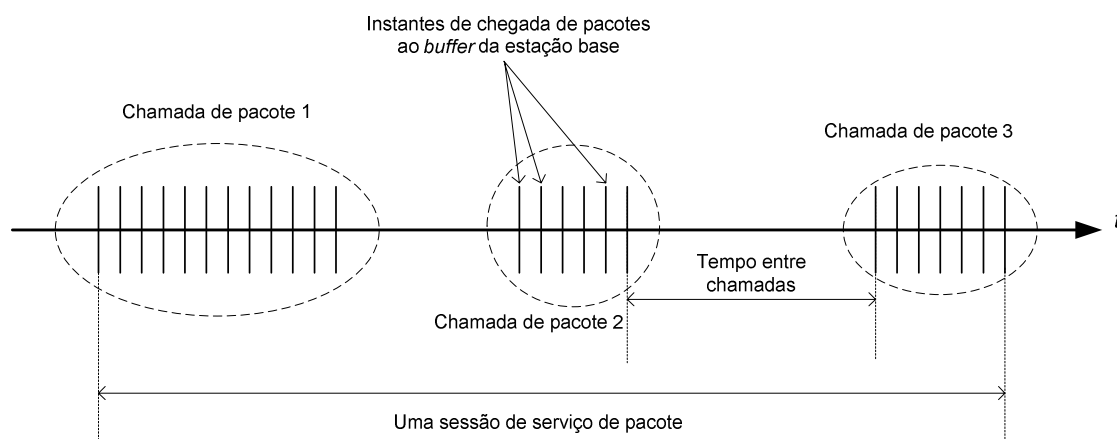


Figura A2-1. Característica típica de uma sessão de serviço de pacote.

Tabela A2.1: Descrição e parâmetros do modelo de tráfego de rajada.

Processo	Distribuição da Probabilidade	Parâmetros
Tamanho da chamada de Pacotes	Pareto	$\alpha = 1.1$ $k = 4.5$ Kbytes (36,000 bits) $m = 2$ Mbytes (16,000,000 bits) $\mu = 25$ Kbytes (6,250,000 bits)
Tempo entre chamadas de pacotes	Geométrica	$\mu = 5$ segundos Tempo entre chamadas foi seleccionado com base em [7]
Tamanho do Pacote	Determinístico	12000 bits
Número de Pacotes por chamada de pacotes	Determinístico	Baseado no tamanho da chamada de pacotes e no tamanho do pacote
Tempo entre chegada de pacotes	Geométrica	$\mu = \text{Tamanho de Pacote} / \text{velocidade de pico da linha}$ Assumiu-se velocidade de pico da linha de 2 Mbps

Anexo III – Interface IP: Ilustração de Captura e ficheiros de saída

Neste anexo apresenta-se um exemplo de utilização do módulo da interface IP. Neste exemplo ilustra-se uma captura de tráfego simples e os respectivos ficheiros de texto criados pelo módulo. A captura foi efectuada na rede Intranet do Instituto de Telecomunicações, Aveiro, com o *sniffer* Ethereal Protocol Analyser v0.10.5a e a Tabela A3.1 apresenta campos de captura de todos os pacotes capturados.

Tabela A3.1: Exemplo de captura de tráfego IPv6.

Captured Packet		Class	Flow label	Source Address	Destination Address
Id	Instant				
01	1.323936	0xe0	0x00000	fe80::201:42ff:feb5:45d0	ff02::9
02	1.644722	0x00	0x00000	fe80::250:4ff:fe33:d0bc	ff02::9
03	2.782117	0x00	0x00000	fe80::2a0:24ff:fe55:9f19	ff02::d
04	9.655144	0x00	0x00000	fe80::250:4ff:fe33:d0bc	ff02::9
05	10.529465	0x00	0x00000	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e	2001:660:3001:4001::53
06	10.586672	0x00	0x00000	2001:660:3001:4001::53	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e
07	11.530671	0x00	0x00000	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e	2001:660:3001:4001::53
08	11.586666	0x00	0x00000	2001:660:3001:4001::53	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e
09	12.530860	0x00	0x00000	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e	2001:660:3001:4001::53
10	12.587016	0x00	0x00000	2001:660:3001:4001::53	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e
11	13.531047	0x00	0x00000	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e	2001:660:3001:4001::53
12	13.587917	0x00	0x00000	2001:660:3001:4001::53	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e
13	14.665301	0x00	0x00000	fe80::250:4ff:fe33:d0bc	ff02::9
14	15.587231	0xe0	0x00000	fe80::201:42ff:feb5:45d0	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e
15	15.588465	0x00	0x00000	2001:690:2380:7770:20c:6eff:fe84:a34e	fe80::201:42ff:feb5:45d0
16	16.380157	0x00	0x00000	fe80::20c:6eff:fe84:a34e	fe80::201:42ff:feb5:45d0
17	16.383007	0xe0	0x00000	fe80::201:42ff:feb5:45d0	fe80::20c:6eff:fe84:a34e
18	19.772055	0x00	0x00000	fe80::2a0:24ff:fe55:9f19	ff02::9
19	21.383441	0xe0	0x00000	fe80::201:42ff:feb5:45d0	fe80::20c:6eff:fe84:a34e
20	21.384736	0x00	0x00000	fe80::20c:6eff:fe84:a34e	fe80::201:42ff:feb5:45d0
21	22.676983	0x00	0x00000	fe80::250:4ff:fe33:d0bc	ff02::9

Os ficheiros de texto criados pelo módulo da Interface IP bem como os respectivos conteúdos são apresentados a seguir.

Ficheiro 1: Instantes de chegada dos pacotes em microssegundos.

```
#instant time of arrival
#streamId:  packets arrival times in microseconds
0      1323936
1      1644722      9655144      14665301      22676983
2      2782117
3      10529465      11530671      12530860      13531047
4      10586672      11586666      12587016      13587917
5      15587231
6      15588465
7      16380157      21384736
8      16383007      21383441
9      19772055
```

Ficheiro 2: Classe de tráfego, que corresponde ao tipo de serviço.

```
#traffic class
#streamId:  packets traffic classes
0      224
1      0      0      0      0
2      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      224
6      0
7      0      0
8      224      224
9      0
```

Ficheiro 3: Tamanho dos pacotes em bytes.

```
#packet length
#streamId:  packets lengths
0      72
1      132      132      132      132
2      94
3      80      80      80      80
4      80      80      80      80
5      72
```

6	72	
7	72	72
8	64	72
9	132	

Ficheiro 4: Identificador do endereço de origem.

```
#sources Id.
#streamId:  sources id
0      0
1      2      2      2      2
2      3
3      5      5      5      5
4      6      6      6      6
5      0
6      5
7      7      7
8      0      0
9      3
```

Ficheiro 5: Identificador do endereço de destino.

```
#destination Id.
#streamId:  dest. Id
0      1
1      1      1      1      1
2      4
3      6      6      6      6
4      5      5      5      5
5      5
6      0
7      0      0
8      7      7
9      1
```


Referências

- [1] Redl, S. M., M. K. Weber and M. W. Oliphant, *An introduction to GSM*, Boston, Artech House, 1995.
- [2] Zvovar, Z., P. Jung and K. Kammerlander, *GSM: Evolution Towards 3rd Generation Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3] Furuskar, A., S. Mazur, F. Muller and H. Olofsson, "EDGE: enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution," *Personal Communications, IEEE* [see also *IEEE Wireless Communications*], Vol. 6, Pag. 56-66, 1999
- [4] Holma, H. and A. Toskala, *WCDMA for UMTS, Radio Access for Third Generation Mobile Communications*, Willey, 2001.
- [5] Hanzo, L., M. Münster, B. J. Choi and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, Willey, 2004.
- [6] 3GPP, "Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access," TSG Radio Access Network, TR 25.848 (v4.0.0), 2001-03.
- [7] 3GPP, "Validation of System-Level HSDPA Results for CDMA and OFDM in a Flat Fading Channel," Nortel Networks, TSG-RAN-1, R1-03-0249, Meeting #31, Tokyo, Japan, 18th -21th February 2003.
- [8] V.Monteiro, R. L. Aguiar and A. Gameiro, "An IP interface for simulation of packet data performance in cellular networks". *ConfTele 2005*, Tomar, Pag. 6-8 April 2005.
- [9] Huy, D. T. P., V. Monteiro, A. Gameiro and J. Rodriguez, "System level performance evaluation of MATRICE air interface". *ISTSummit 2004*, Lyon, France, Pag. 27-30 June 2004.
- [10] Monteiro, V., A. Gameiro and R. L. Aguiar, "Scheduling Algorithm for Beyond 3G Systems based on MC-CDMA". *WMPC 2004*, 12-15 September 2004, Abano Terme, Italy, Pag. 2004.
- [11] 3GPP LTE, Long Term Evolution group,
http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WGs_LongTermEvolution/LTE_2005_03_Tokyo/LTE_doc_list.
- [12] ITU, "Vision, framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000," ITU-R, Draft, 2003.
- [13] Eurescom, "The Operator's vision on systems beyond 3G," EDIN 0359-1203, P1203, 2002.
- [14] PSTN, 4G Services and Applications, Public Safety Wireless Network Programme, <http://www.pswn.gov/search/>,
- [15] Norman, D., *The invisible computer*, MIT Press, 1998.
- [16] Prasad, R., *OFDM for Wireless Communications Systems*, Artech House, 2004.

- [17] Hara, S. and R. Prasad, *Multicarrier Techniques for the 4G Mobile Communications*, Artech House, 2003.
- [18] Kaiser, S. (1998). *A Multi-Carrier CDMA Mobile Radio Systems - Analysis and Optimization of Detection, Decoding, and Channel Estimation*. Dusseldorf, Germany, VDI-Verlag.
- [19] Jankiraman, M., *Space-Time Codes and MIMO Systems*, Artech House, 2004.
- [20] IST-MATRICE, "Specification of the performance evaluation methodology and the target performance," IST-2001-32620, Deliverable 1.3, 2002.
- [21] IST-MATRICE, "Duplex mode," IST-2001-32620, Deliverable 1.1b, 2003.
- [22] IST-MATRICE, *MC-CDMA Transmission Techniques for Integrated Broadband Cellular Systems*, IST-2001-32620 - www.ist-matrice.org, 2002
- [23] IST-MATRICE, "Reference scenario specification: final description," IST-2001-32620, Deliverable D1.4, 2003.
- [24] 3GPP-TSRAN, "Radio Interface Protocol Architecture," 3GPP - TSG Radio Access Network, TS 25.301 (V.4.4.0), 2002.
- [25] ETSI-UMTS, "Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS," Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), TR 101 112 v3.2.0, April 1998.
- [26] IST-MATRICE, "Physical Layer Simulation Chain Description (Reference chain V0)," IST-2001-32620, Deliverable 3.1, 2002.
- [27] Jakes, W. C., *Microwave Mobile Communications*, 1974, AT&T IMP Corp, Reprinted by IEEE Press, 1994.
- [28] IETF, "Snoop Version 2 Packet Capture File Format," Network Working Group, RFC-1761 <http://www.rfc-archive.org/getrfc.php?rfc=1761>,
- [29] Thomas, S. A., *IP NG and the TCP/IP protocols - Implementing the new generation Internet*, Wiley Computer Publishing, 1996.
- [30] Wang, Z., *Internet QoS, Architectures and Mechanisms for Quality of Service*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [31] IETF, The Internet Engineering Task Force Website,, <http://www.ietf.org/>,
- [32] Braden, R., D. Clark and S. Shenker, "Integrated Services in the internet architecture: An overview," Internet Engineering Task Force, RFC 1633, June 1994.
- [33] Carlson, M., W. Weiss, S. Blake, Z. Wang, D. Black and E. Davies, "An Architecture for Differentiated Services," Internet Engineering Task Force, RFC 2475, December 1998.
- [34] Chen, Y., C. Qiao, M. Hamdi and D. H. K. Tsang, "Proportional differentiation: a scalable QoS approach," *Communications Magazine*, IEEE, Vol. 41, Pag. 52-58, 2003
- [35] Dovrolis, C., D. Stiliadis and P. Ramanathan, "Proportional differentiated services: delay differentiation and packet scheduling," *Networking*, IEEE/ACM Transactions on, Vol. 10, Pag. 12-26, 2002
- [36] Liebeherr, J. and N. Christin, "Rate allocation and buffer management for differentiated services," *Computer Networks*, Vol. 40, Pag. 89-110, 2002
- [37] Quynh, T. N., H. Karl, A. Wolisz and K. Rebersburg, "The influence of proportional jitter and delay on end to end delay in differentiated service network". *Network Computing and Applications*, 2001. NCA 2001. IEEE International Symposium on, Pag. 354-357, 2001.
- [38] Oteng-Amoako, K., J. Yuan and S. Nooshabadi, "Selective hybrid-ARQ schemes with various combining methods in fading channels". *Workshop Wiopt'03 Modeling and optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, INRIA Sophia Antipolis, France, Pag. 339-341, Mar. 2003.
- [39] 3GPP, "UMTS Bearer Service Attributes," TSGSA- WG2 QoS ad-hoc, Alcatel, Tdoc S2-99195, Tokyo, Japan, April 22, 1999.

- [40] Kyriazakos, S. A. and G. T. Karestsos, *Practical Radio Resource Management in Wireless Systems*, Artech House, 2004.
- [41] Nanda, S., D. J. Goodman and U. Timor, "Performance of PRMA: a packet voice protocol for cellular systems," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, Vol. 40, Pag. 584-598, 1991
- [42] IST-MATRICE, "Layer 2 & 3 Simulation Platform - Intermediate Version," IST-2001-32620, Deliverable 4.4, 2004.
- [43] IST-MATRICE, "Layer 2 & 3 reference simulation results – dynamic resource allocation algorithms and IP transport," IST-2001-32620, Deliverable 4.5, 2004.
- [44] IST-MATRICE, "Layer 2 & 3 Simulation Platform Description," IST-2001-32620, Deliverable 4.1, 2002.
- [45] IST-MATRICE, "Simulation Library Description," IST-2001-32620, Deliverable 4.2, 2003.
- [46] ETSI-UMTS, "HIPERLAN/2 Radio Channel Simulation," Project BRAN Channel Model, 3TTP071a document, January 1998.
- [47] Li, Y. and X. Huang, "The generation of independent Rayleigh faders". Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on, Pag. 41-45 vol.1, 2000.